

Konzeption, Aufbau und Erprobung eines Verfahrens
zur Optimierung wellenbasierter
Umfeldüberwachungssysteme für fahrerlose
Flurförderfahrzeuge

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades

der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Alexander Urban

aus Ulm

genehmigt von der

Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

26. März 2014

Vorsitzende/Vorsitzender der Promotionskommission:

Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts

Hauptberichterstatterin/Hauptberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Martin Vossiek

Mitberichterstatterin/Mitberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Christian Bohn

Miss alles, was sich messen lässt, und mach alles messbar, was sich nicht messen lässt.”

Galileo Galilei (1564 - 1642)

Vorwort

Das Thema der vorliegenden Arbeit wurde von mir während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Informationstechnik der Technischen Universität Clausthal bearbeitet und im Zeitraum von Januar 2012 bis Juni 2013 neben meiner Tätigkeit bei der Volkswagen AG zu einer wissenschaftlichen Abhandlung zusammengefasst.

Mein Dank gilt meinen Kollegen Dr. Georg Bauer, Tobias Schäfer, Fabian Kirsch, Randolph Ebelt, Sergej Mamaschew und Dr. Stephan Max, die mir stets mit einem offenen Ohr und konstruktiven Anregungen zur Seite standen.

Mein besonderer Dank gilt weiterhin Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Vossiek, der mir die Möglichkeit zu dieser Arbeit gab, mir eigenständiges Arbeiten ermöglichte und dessen Engagement und Geduld maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich möchte weiterhin Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Bohn für die Übernahme des Koreferendariats danken, den ich in unserer gemeinsamen Zeit am Institut als Mensch und Professor kennen und schätzen lernen durfte.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, welche mich stets nach allen Kräften unterstützt und somit meinen Ausbildungsweg erst ermöglicht hat.

Schlussendlich möchte ich die meiner Frau Kristin für ihre Liebe, Zuneigung und unerschütterliche Geduld danken, die sie während der letzten Jahre mir gegenüber aufgebracht hat, ohne ihren Rückhalt wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Gifhorn, im Juni 2013

Alexander Urban

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	14
1.1	Motivation	14
1.2	Zielsetzung der Dissertation.....	16
1.3	Stand der Technik	17
2	Wellenbasierte Objektortung	21
2.1	Ausbreitung akustischer Wellen in Luft	21
2.1.1	Grundlagen der Schallausbreitung	21
2.2	Abbildung von Objekten mit Ultraschallsystemen	25
2.2.1	Eigenschaften von Abbildungssystemen.....	26
2.2.2	Abstandsbestimmung durch Impuls-Echo Verfahren.....	29
2.2.3	Hüllkurvendemodulation	32
2.2.4	Abbildung von Objektszenen durch Trilateration.....	34
2.2.5	Abbildung von Objektszenen durch laufzeitrichtige Addition.....	37
2.2.6	Abbildung von Objektszenen durch Umfeldkarten	38
3	Mustererkennung	40
3.1	Vorverarbeitung	40
3.2	Merkmalsextraktion	41
3.2.1	Hough Transformation	42
3.3	Klassifizierung	45
4	Geometrische und mechanische Randbedingungen	46
4.1.1	Wandleranordnung	46
4.1.2	Modellierung der Fahrzeugbewegung	47
5	Herausforderungen aktuell eingesetzter Systeme	50
6	Entwickelter Algorithmus zur Umfeldklassifizierung	54

6.1	Mustererkennung	54
6.2	Vorverarbeitung	54
6.3	Merkmalsextraktion	55
6.3.1	Räumliches Optimalfilter für beliebige Objektgeometrien.....	55
6.3.2	Geometrische Herleitung des Reflexionsmusters	56
6.3.3	Zuordnung von Echoanteilen zu Objektmerkmalen	59
6.4	Klassifizierung	64
6.5	Rekonstruktion der Objektszene	65
6.5.1	Abschätzung der Ausdehnung der Objekte	65
6.5.2	Bestimmung der Sichtbarkeit detektierter Objekte	66
6.5.3	Selektive Unterdrückung von Echoanteilen.....	68
6.5.4	Synthetische Wandleranordnung.....	72
6.5.5	Rechenaufwand	75
7	Systemaufbau	78
7.1	Verwendete Ultraschallsensorik	80
7.2	Entwickelte Elektronik.....	82
7.3	Versuchsplattform.....	85
7.4	Augmented Reality Interface	87
8	Erprobung.....	89
8.1	Abbildung von Objektszenen mittels Mehr-wandleranordnung	89
8.1.1	Abbildung von Objektszenen mit mehreren Objektklassen.....	91
8.1.2	Unterdrückung der Signalanteile erkannter Objektklassen.....	96
8.1.3	Prototypische Augmented-Reality-Darstellung der gewonnenen Objektinformation	97
8.2	Konturenabbildung quer zur Fahrtrichtung.....	98
8.2.1	Bewegter Einzelwandler	99
9	Zusammenfassung und Ausblick	105
10	Literaturverzeichnis	106

Abkürzungen und verwendete Formelzeichen

ν	Schallschnelle
ξ	Auslenkung der Teilchen
x_0	Ruhelage der Teilchen
p	Schalldruck
ρ_0	Gasdichte unter Normbedingungen
c	Phasengeschwindigkeit
t	Zeit
K	Lenkwinkel
γ	Adiabatenexponent
R	Universelle Gaskonstante
M	Molare Masse
k	Kreiswellenzahl
ω	Kreisfrequenz
$p_{abs,i}$	Absolutdruck am Ort i
p_0	Umgebungsdruck
$p_i(t)$	Zeitliche Druckschwankung am Ort i
η	Dynamische Viskosität
c_p	Isobare Wärmekapazität
c_v	Isochore Wärmekapazität
α_V	Absorptionskoeffizient (innere Reibung)
α_L	Absorptionskoeffizient (intramolekulare Schwingungen)
ΔL	Dämpfung

d	Distanz
τ	Laufzeit
δ	Auflösung
B	Bandbreite
$A(t)$	Amplitudenverlauf
$M(t)$	Verlauf der aufmodulierten Information
N	Anzahl der Wandler im Array
$H(j\omega)$	Übertragungsfunktion des Tiefpassfilters
r_i	Radius des Kreises i
x_{Mi}	X-Koordinate des Mittelpunkts des Kreises i
y_{Mi}	Y-Koordinate des Mittelpunkts des Kreises i
x_{Ti}	X-Koordinate der Position von Wandler i
y_{Ti}	Y-Koordinate der Position von Wandler i
$x_{E,ij}$	X-Koordinate des Mittelpunkts der Ellipse aus Wandler i und j
$y_{E,ij}$	Y-Koordinate des Mittelpunkts der Ellipse aus Wandler i und j
I	Anzahl nicht redundanter Übertragungswege
$P(x, y)$	Gewicht des Bildpunkts (x, y) im Bildraum
$S(\alpha, d_L)$	Gewicht im Parameterraum
M	Momentenpol der Fahrzeugrotation
R	Distanz zwischen Momentenpol und Mittelpunkt der Starrachse
δ	Lenkwinkel des Fahrzeugs
D	Distanz zwischen Mittelpunkt von Starr- und Lenkachse
x_M	X-Koordinate des Momentenpols

y_M	Y-Koordinate des Momentenpols
x_Q	X-Koordinate des Mittelpunkts der Querachse
y_Q	Y-Koordinate des Mittelpunkts der Querachse
ϑ	Rotationswinkel des Fahrzeugs
s	Distanz zwischen Radaufhängung und Mitte der Starrachse
b	Zurückgelegter Weg des erfassten Rades
φ	Winkel zwischen Starrachse und x-Achse
α	Winkel zwischen Lotgerade und x-Achse
d_L	Länge der Lotgeraden
x_g	X-Koordinate des Stützpunkts der Geraden g
y_g	Y-Koordinate des Stützpunkts der Geraden g
Δ_x	X-Komponente der Steigung der Geraden g
Δ_y	Y-Komponente der Steigung der Geraden g
P_{Ref}	Referenzpunkt für die Berechnung der Zuordnungstabellen
P_L	Lotfußpunkt der Geraden
R_T	Distanz zwischen Ziel und Trajektorie des Fahrzeugs
L_T	Maximale Länge der synthetischen Wandleranordnung
ζ	Öffnungswinkel des bewegten Wandlers
x_R	X-Koordinate des Referenzpunkts
y_R	Y-Koordinate des Referenzpunkts
x_L	X-Koordinate des Lotfußpunkts
y_L	Y-Koordinate des Lotfußpunkts
$x_{refl,ij}$	X-Koordinate des Reflexionspunkts des Übertragungswegs i-j

$y_{refl,ij}$	Y-Koordinate des Reflexionspunkts des Übertragungswegs i-j
X	Ausdehnung des Bildraums in x-Richtung
Y	Ausdehnung des Bildraums in y-Richtung
δ_x	Auflösung des Bildraums in x-Richtung
δ_y	Auflösung des Bildraums in y-Richtung
δ_α	Auflösung des Parameterraums in der Dimension α
δ_{d_L}	Auflösung des Parameterraums in der Dimension d_L
N_{Bild}	Anzahl notwendiger Rechenoperationen zur Bildgenerierung
N_{Hough}	Anzahl notwendiger Rechenoperationen für Hough-Transformation
N_{Gesamt}	Anzahl notwendiger Rechenoperationen für Bildgenerierung und Hough-Transformation
N_{Filter}	Anzahl notwendiger Rechenoperationen für Ortungsergebnis durch Filteralgorithmus
$d_{L,min}$	Minimal notwendige Lotfußpunktdistanz zur Überwachung eines Areal

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Logistiksystem RELAG der Firma SEP [7]	14
Abbildung 2: „Look Out“ System [20]	18
Abbildung 3: Local Positioning Radar [5]	18
Abbildung 4: NoColl System [19]	19
Abbildung 5: Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Luftschalldämpfung durch Absorption [34]	25
Abbildung 6: Bandbreite eines Abbildungssystems	27
Abbildung 7: Einhüllende eines Abbildungssystems	28
Abbildung 8: Bestimmung des Auflösungsvermögens	29
Abbildung 9: Freiraumdämpfung in Ausbreitungsrichtung	31
Abbildung 10: Schematischer Aufbau eines Impuls-Echo-Systems	31
Abbildung 11: Analoges Echoprofil einer Ultraschallmessung	33
Abbildung 12: Hüllkurve des Echoprofils	34
Abbildung 13: Simulation einer analytischen Trilateration für einen Punktstreuer	36
Abbildung 14: Simulation einer laufzeitrichtigen, additiven Lokalisierung	38
Abbildung 15: Überführung einer Geraden in den Hough Raum	43
Abbildung 16: Ergebnis der Hough Transformation für ein Binärbild mit Linienstrukturen	44
Abbildung 17: Wandleranordnung am Flurförderfahrzeug	47
Abbildung 18: Kurvenfahrt eines zweispurigen Fahrzeugs	49
Abbildung 19: Einfahren in Bucht quer zur Fahrtrichtung	50
Abbildung 20: Annäherung an zwei Punktziele vor Störreflektor	51
Abbildung 21: Simulationsergebnis bei Gegenwart einer Wand	52
Abbildung 22: Reflexion einer ebenen Welle nach dem Huygens'schen Prinzip	56
Abbildung 23: Charakteristische Reflexionspunkte einer Wand	57
Abbildung 24: Zuordnungstabellen für Sensor T_1	60
Abbildung 25: Simulierte Echoprofile einer Wand unter einem Winkel von 30° und einem Abstand von 80 cm zur Wandleranordnung	61
Abbildung 26: Simuliertes Filterergebnis einer Wand mit identischem Fußpunkt unter den Winkeln 0° (oben), 15° , 30° und 45° (unten)	63
Abbildung 27: Simulierte Parameterräume für die Objektklassen Linie (links) und Punktstreuer (rechts)	64
Abbildung 28: Ausdehnungsabschätzung	66
Abbildung 29: Bestimmung der Sichtbarkeit	68
Abbildung 30: Ergebnis einer Trilateration mit mehreren Objekten	69

Abbildung 31: Ergebnis nach Unterdrückung.....	71
Abbildung 32: Charakteristische Punkte bei bewegtem Wandler	72
Abbildung 33: Schema synthetische Wandleranordnung	73
Abbildung 34: Verzerrung des Parameterraums für 0m (links) und 5,18m (rechts)	74
Abbildung 35: Beziehung überwachter Bereich Bildraum und Parameterraum.....	76
Abbildung 36: Verhältnis der notwendigen Rechenoperationen für $\Delta=0.01m$	77
Abbildung 37: Systemschaltbild Wandleranordnung	78
Abbildung 38: Systemschaltbild Einzelwandler	79
Abbildung 39: Verwendeter Ultraschallwandler	81
Abbildung 40: Basisplatine	83
Abbildung 41: Aufbau Ultraschall IC.....	84
Abbildung 42: Ultraschallmodul.....	85
Abbildung 43: Messplattform.....	86
Abbildung 44: Sichtbereich der eingesetzten Kamera	88
Abbildung 45: Messszenario für die Abbildung von Objektszenen mehrerer Objektklassen..	90
Abbildung 46: Parameterraum der Objektszene.....	90
Abbildung 47: Simulierte Bildräume für Linienfilter (links) und Punktfiler (rechts)	91
Abbildung 48: Gemessene Bildräume für Linienfilter (links) und Punktfiler (rechts).....	91
Abbildung 49: Simulierter (links) und gemessener (rechts) Bildraum für ein Punktziel	92
Abbildung 50: Filterausgabe für Punkt- und Linienstreuer über den gesamten Winkelbereich in Objektentfernung.....	93
Abbildung 51: Verhältnis der Filterausgabe für Punkt- und Linienstreuer über den gesamten Winkelbereich in Objektentfernung	93
Abbildung 52: Rekonstruktion einer Objektszene mit zwei Wänden unter 135°.....	94
Abbildung 53: Rekonstruktion einer Objektszene mit zwei Wänden unter 135° und zwei Punktstreuern	95
Abbildung 54: Objektrekonstruktion bei einer Wand und zwei Punktstreuern.....	95
Abbildung 55: Objektrekonstruktion bei Mehrzielszenario	95
Abbildung 56: Bildraum der laufzeitrichtigen Addition vor (links) und nach der Unterdrückung (rechts)	96
Abbildung 57: Augmented Reality Bild.....	97
Abbildung 58: Messszenario Palettenfront	98
Abbildung 59: Messszenario lose Güterpaletten	99
Abbildung 60: Angulares Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke für das Messszenario „lose Güterpaletten“	99

Abbildung 61: Parameterraum in Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke entlang eines Fahrzeughecks in 50cm Entfernung	101
Abbildung 62: Umfeldkarte der Vermessung der „Palettenfront“	103
Abbildung 63: Umfeldkarte der Vermessung loser „Güterpaletten“	104

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Abbildung der Umwelt mittels aktiver Sensorsysteme sowohl zur Bestimmung der eigenen Position als auch zur Erfassung der relativen Position relevanter Objekte in der unmittelbaren Umgebung zur Gewährleistung der für autonome Systeme geforderten Sicherheitsvorgaben stellt nach wie vor eine der Kernherausforderungen bei der Steigerung des Automatisierungsgrads industrieller Anwendungen dar. Aus diesem Grund ist eine Vielzahl wissenschaftlicher Publikationen den Themenkomplexen der industriellen Automatisierung gewidmet wie etwa in [1], [2] und [3] zu sehen ist.

Vor allem im Bereich der Logistik haben die technologischen Fortschritte der jüngsten Zeit den Bedarf für zuverlässige Umfeldüberwachungs- bzw. Abbildungssysteme aufgezeigt. Die Verfolgung von Gütern durch Ortung der eingesetzten Transportmittel hat völlig neue Möglichkeiten zur Optimierung des Warenflusses eröffnet [4], was beispielhaft anhand eines aktuellen am Markt verfügbaren Systems in Abbildung 1 gezeigt wird. Besondere Erwähnung verdienen hierbei auch die in jüngster Vergangenheit entwickelten, funkbasierten lokalen Ortungssysteme wie etwa das "Local Positioning Radar" (LPR) der Firma Symeo [5], welche als „Enabler-Technologien“ diese Art der Warenverfolgung erlauben, da diese mit minimalem Installationsaufwand und hoher Unabhängigkeit von der Topologie der Lagerstätte eine zuverlässige, lückenlose Ortung der Transportmittel im cm Bereich ermöglichen [6].

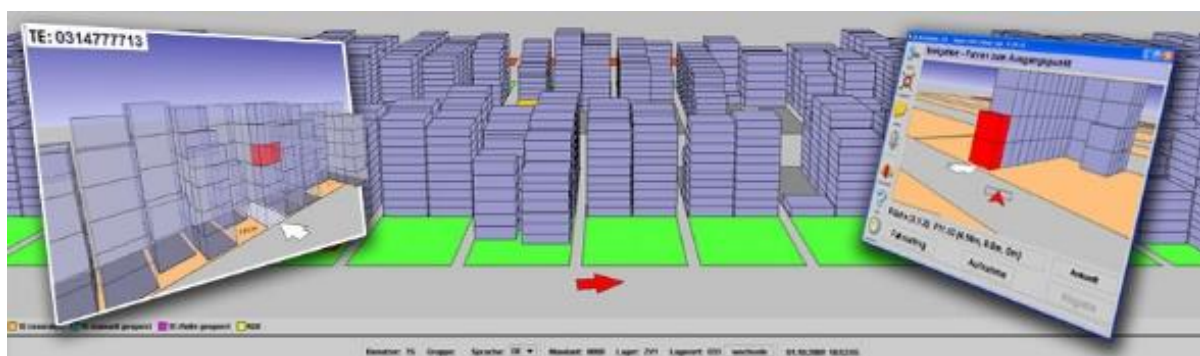


Abbildung 1: Logistiksystem RELAG der Firma SEP [7]

Die beschriebenen Systeme werden heutzutage zumeist als unterstützende Assistenzsysteme zur Steigerung der Effizienz des Warentransports für personengeführte Flurförderfahrzeuge

eingesetzt. Ein Betrieb autonomer Flurförderfahrzeuge allein gestützt durch funkbasierte Ortungssysteme ist aufgrund der sich ständig ändernden Topologie aktiver Lagerstätten und den sich damit ergebenden hochdynamischen Mehrwegsituationen momentan noch nicht realisierbar. Vor allem für die Kollisionsvermeidung in stark beengten Umgebungen werden zusätzliche Systeme benötigt.

Trotz der bereits bestehenden Ansätze zur Umfeldüberwachung in industriellen Umgebungen durch Kamera- [8], RFID- [9] und Ultraschallsysteme [10] treten selbst beim durch den Menschen geführten Gütertransport noch immer schwere und schwerste Unfälle innerhalb komplexer Lagerstätten auf, wie in [11], [12] und [13] belegt wird..

Eine 2009 von der Occupational Safety and Health Administration (OSHA) in den USA durchgeführte Studie zur Sicherheit von Gabelstaplern [14] lieferte eindrucksvolle Kennzahlen in diesem Zusammenhang. Der Studie zu Folge treten jedes Jahr geschätzte 110.000 Unfälle im Zusammenhang mit Gabelstaplern auf. Der daraus resultierende wirtschaftliche Schaden beläuft sich dabei auf etwa 135.000.000\$. 70% der gemeldeten Unfälle hätten dabei durch bessere Sicherheitsmaßnahmen vermieden werden können.

Diese Tatsache ist mehreren Ursachen geschuldet. Zum einen sind viele aktuell eingesetzte Flurförderzeuge noch nicht mit aktiven Sicherheitssystemen ausgestattet, zum anderen treten auch mit aktiver Sicherheitstechnik noch Unfälle auf. Die Schuld für das weitere Auftreten von Arbeitsunfällen liegt zum einen bei der Technik, da diese in seltenen Fällen Objekte bzw. Passanten übersehen und durch das damit verbundene Ausbleiben eines Warnsignals zum Unfall führen können. Ein weiterer Grund für weiterhin stetig auftretende Unfälle ist jedoch direkt dem Fahrzeugführer und indirekt ebenfalls den Warnsystemen anzulasten. Reagieren Systeme zu sensibel und generieren gehäuft Fehlwarnungen so ist zu beobachten, dass die Fahrzeugführer die Warnsignale vermehrt aus Gewohnheit ignorieren und das Fahrzeug nach Gefühl bedienen, wodurch das installierte System keinen Sicherheitsgewinn mehr darstellt.

Die Realisierung autonomer, durch Funknavigation geleiteter Transportsysteme sowie die Reduktion der noch immer auftretenden Unfälle setzen eine Verbesserung der Zuverlässigkeit bestehender Systeme voraus. Einen Ansatz für Systeme in Flurförderfahrzeugen stellt das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur Verarbeitung der von aktuellen Warnsystemen aufgenommenen Signale dar.

1.2 Zielsetzung der Dissertation

Die vorliegende Arbeit soll Ansätze zur Optimierung bzw. Ergänzung bestehender Umfelderkennungssysteme aufzeigen. Diese begründen sich dabei auf eine rekonstruktive Algorithmen, welche eine verbesserte Verarbeitung der, von den heutzutage weit verbreiteten wellenbasierten Detektionssystemen zur Kollisionsvermeidung, zur Verfügung gestellten Signalinformation darstellt.

Die Steigerung der Eindeutigkeit bei der Objektdetektion im unmittelbaren Nahbereich durch das entwickelte Verfahren sowie der daraus resultierende Gewinn an Sicherheit sollen an lebensnahen Beispielen aus dem täglichen Betrieb von Flurförderfahrzeugen vermittelt werden. So sind die Anforderungen die von Funktionen wie dem Personenschutz oder der Kollisionsvermeidung mit Objekten aus dem Umfeld an die Sensorik gestellt werden noch immer nicht zu 100% erfüllt. Vor allem der Personenschutz stellt hierbei eines der größten Hemmnisse auf dem Weg zum autonomen Betrieb der Flurförderfahrzeuge dar.

Weiterhin sollen Synergieeffekte mit aktuell eingesetzten, drahtlosen Lösungen zur Effizienzsteigerung im Logistikbereich sowie die daraus erwachsende Möglichkeit eines autonomen Betriebs der Flurförderfahrzeuge herausgearbeitet und diskutiert werden. Hierbei werden in der Regel funkbasierte Systeme zur Positions- und Orientierungsbestimmung der Flurförderfahrzeuge eingesetzt. Aufgrund der vom Gesetzgeber eingeschränkten Bandbreite dieser Systeme [15] in Verbindung mit einer sich dynamisch verändernden Umgebung ist eine zuverlässige Kollisionsvermeidung nur eingeschränkt und in einem größeren Maße realisierbar. Ein zuverlässiger Personenschutz oder das Manövrieren der Fahrzeuge in extrem beengten Umgebungen kann von diesen Systemen in ihrer derzeitigen Form allein nicht geleistet werden.

Abschließend sollen Ansätze zur Weiterarbeit über das hier vorgestellte Verfahren hinaus dargelegt werden. Hierbei stellen vor allem Ultra-Breitband-Radarsysteme eine interessante Option zur Implementierung und Weiterentwicklung des Verfahrens dar.

1.3 Stand der Technik

Zu den Hauptaufgaben der heutzutage in der Logistik eingesetzten Systemsteuerung zählt neben Fahrzeugdisposition die Verkehrskontrolle bzw. -lenkung [16]. Ein zentrales Aufgabenfeld in diesem Zusammenhang stellt die Blockstreckensteuerung dar, die sich zum einen aus der Verkehrslenkung bei komplexen Streckentopologien und zum anderen aus der Kollisionsvermeidung zwischen Fahrzeugen bzw. zwischen Fahrzeugen und der Umgebung zusammensetzt. Je nach technischer Ausprägung kann eine Blockstrecke einen realen Abschnitt (Induktionsschleife) als auch einen virtuellen Abschnitt (elektronischer Kartenabschnitt) des Logistiksystems repräsentieren.

Bei der grundlegenden Kategorisierung der aktuell am Markt verfügbaren Systeme wird analog nach der Art der Fahrzeugführung unter Systemen mit realer und virtueller Leitlinie unterschieden. Die aktuell am häufigsten eingesetzten Systeme zählen zur Kategorie der realen Leitliniensysteme und basieren in der Regel auf induktiver, mechanischer, optischer oder magnetischer Führung der Fahrzeuge mit Hilfe physikalischer Orientierungselemente wie Referenzmarken [17], Leitdrähten oder auch Leitschienen in der Fahrbahnebene. Die Installation dieser Orientierungshilfen stellt eine mittel- bis hochaufwendige Investition in das Arbeitsumfeld der Fahrzeuge dar und ist einer der großen Nachteile dieser Systemausprägung. Weiterhin leiden fest installierte Systeme unter einer eingeschränkten Flexibilität die vor allem bei mechanischen Systemen zu Tage tritt, wo aufgrund der Führung durch einen Stift innerhalb einer Schiene schon bei grundlegenden Operationen wie etwa Fahrkursänderungen Probleme auftreten können. Als Vorteile der physischen Leitsysteme sind vor allem die Möglichkeit der Energieversorgung und Kommunikation über das Leitelement zu nennen.

Systeme mit virtueller Leitlinie realisieren die Bahnbeschreibung der Fahrzeugbewegung über im Fahrzeugrechner hinterlegte Umgebungsmodelle in Form von Umfeldkarten und Entfernungstabellen, welche durch im Arbeitsumfeld installierte Absolut- sowie im Fahrzeug installierte Relativsensorik gestützt werden.

Die Absolutsensorik ist bei Systemen dieser Art zumeist drahtlos und erfüllt je nach technischer Ausprägung zum einen die Aufgabe der kontinuierlichen Positionierung (Radarsysteme, Laserscanner, Kamerasysteme) als auch zum anderen die Funktion der Referenzbake (Infrarotsysteme). Hierbei kommen Echtzeitortungssysteme basierend auf Kameras (Sky-Trax der Firma Log Trek [18]), Infrarotsensoren (NoColl der Firma tbm

hightech control [19], Look Out der Firma Collision Awareness [20]), Radar (Local Positioning Radar der Firma Symeo [5])

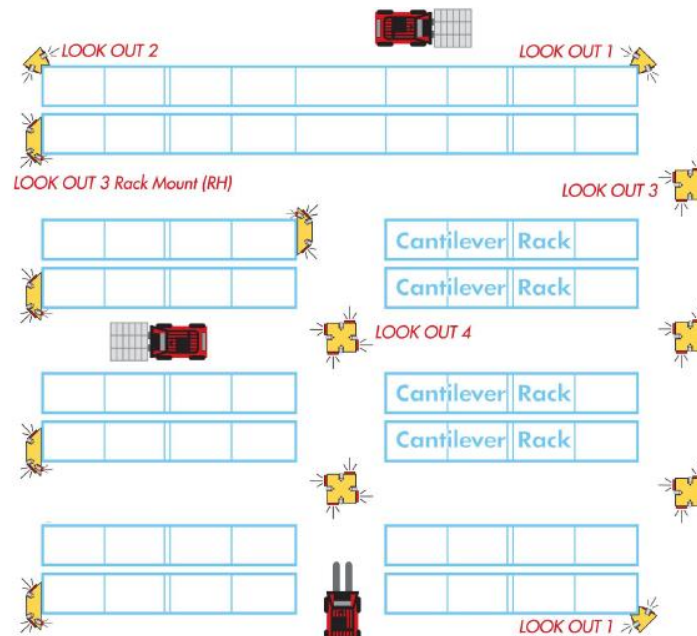


Abbildung 2: „Look Out“ System [20]

Als fahrzeugbasierte Relativsensorik kommen vor allem Inertialsensoren zum Einsatz welche bei auf Referenzbaken basierenden Systemen die zur Koppelnavigation zwischen den Referenzpunkten notwendige Information liefern. Teilweise werden unterstützende Ultraschallsensoren für die Kollisionsvermeidung und Bahnführung eingesetzt. Abbildung 3 zeigt exemplarisch den prinzipiellen Aufbau einer wellenbasierten Ortung wie sie z.B. von der Firma Symeo angeboten wird und bei virtuellen Leitsystemen zum Einsatz kommen könnte.

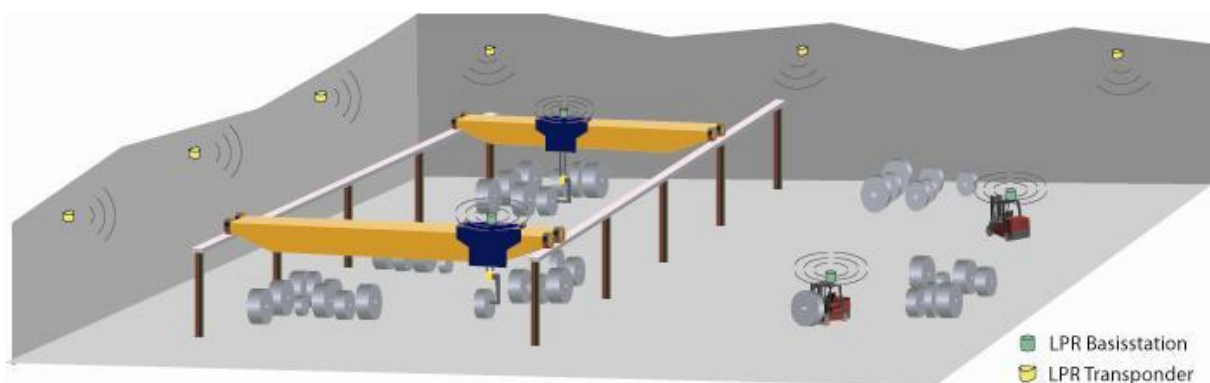


Abbildung 3: Local Positioning Radar [5]

Beim dargestellten Beispielsystem wird die Position des Flurförderzeugs kontinuierlich mittels kooperativen Radarsensoren in der Umgebung und in den Fahrzeugen erfasst. Die so gewonnenen Informationen werden dabei derzeit vor allem zur Warenverfolgung genutzt könnten unter Umständen jedoch auch für eine autonome Fahrzeugführung eingesetzt werden.

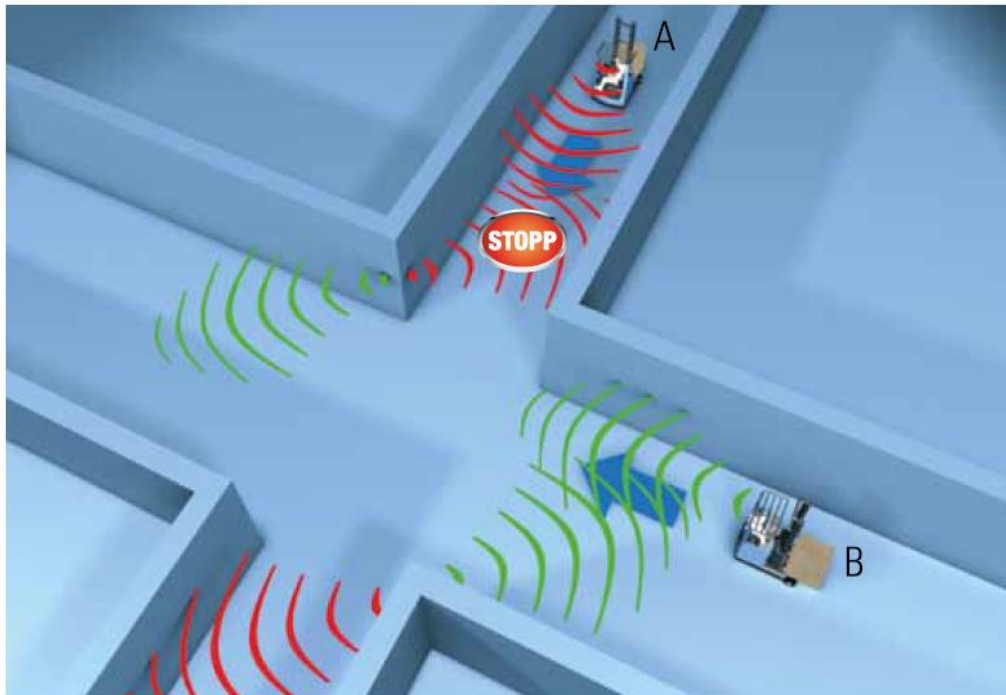


Abbildung 4: NoColl System [19]

Die wissenschaftliche Weiterentwicklung der autonomen Fahrzeugführung findet vor allem im Bereich der Robotik statt und beschäftigt sich vor allem mit den Aspekten der Kollisionsvermeidung wie sie in [21], [22] und [23] beschrieben wird, der Lokalisierung wie in [24], [25] und [26] gezeigt ist sowie mit der Navigation in unbekanntem Umfeld, was in [27], [28] und [29] dargestellt ist. Das Feld der Sensordatenfusion spielt ebenfalls eine große Rolle, da sich durch den Einsatz redundanter Sensortechnologien deutlich robustere Systeme darstellen lassen. In [30], [31], [32] und [33] wird das Thema hinsichtlich autonomer Roboter bzw. Fahrzeuge beleuchtet. So werden derzeit vor allem Systeme für die autonome Navigation von mobilen Robotern für verschiedene Anwendungsszenarien entwickelt. Neben der sensorischen Erfassung der Umwelt bzw. der Fusion der von den Sensoren aufgenommenen Daten stehen dabei besonders Regelalgorithmen zur autonomen Bahnführung und Kollisionsvermeidung im Fokus. Die eingesetzte Sensorik umfasst dabei das komplette Spektrum der bekannten berührungslosen Messeffekte und erstreckt sich von

kapazitiven, induktiven und Ultraschallbasierten Sensoren bis hin zu Laserscannern und der Ortung über WLAN-Netzwerke.

Neben der Fahrzeugführung kommt dem Sicherheitsaspekt bei autonom betriebenen Fahrzeugen eine zentrale Rolle zu. Die vor allem seitens Funktionen wie dem Personenschutz gestellten Anforderungen werden von den aktuell verfügbaren Systemen nicht komplett befriedigt, da Diese in erster Linie auf personengesteuerte Flurförderzeuge abzielen. Der überwiegende Großteil der aktuell verfügbaren Systeme dient dem Personenschutz. Die Systeme unterscheiden sich dabei hauptsächlich hinsichtlich der eingesetzten Sensortechnologie.

2 Wellenbasierte Objektortung

Die Detektion und Lokalisierung von Objekten durch elektromagnetische und akustische Wellen ist die Basis einer Vielzahl industrieller, ziviler und militärischer Kontroll-, Sicherheits- und Warnsysteme. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren besitzt hinsichtlich der eingesetzten physikalischen Wellenart keine Einschränkungen. Ein Einsatz ist sowohl mit akustischen Systemen wie etwa Ultraschallabstandswarnern als auch mit Radarsystemen denkbar. Die einzige Einschränkung stellt das Auflösungsvermögen des verwendeten Systems dar, welches für eine zuverlässige Abbildung des Nahbereichs im Bereich gängiger Ultraschallsysteme wenige Zentimeter betragen sollte. Auflösungen in diesem Bereich sind bei Mikrowellensystemen in der Regel nur durch Ultra-Wide-Band-Systeme realisierbar, weshalb diese die primären Kandidaten für eine Umsetzung des Verfahrens für Radarsysteme darstellen. In der vorliegenden Arbeit wurde das Verfahren für ein Ultraschallsystem implementiert weshalb im Folgenden auf die Grundlagen der akustischen Wellenpropagation eingegangen werden soll.

2.1 Ausbreitung akustischer Wellen in Luft

Der Einsatz akustischer Wellen zur Objektdetektion setzt ein Verständnis der physikalischen Gesetzmäßigkeiten bei deren Propagation voraus. Im Folgenden soll daher genauer auf die physikalischen Vorgänge bei Ausbreitung und Beugung akustischer Wellen eingegangen werden.

2.1.1 Grundlagen der Schallausbreitung

Die Ausbreitung akustischer Wellen lässt sich fundamental als Auslenkung ξ der Teilchen des Ausbreitungsmediums aus deren Ruhelage x_0 beschreiben als deren Schallschnelle v nach:

$$v = \frac{\partial \xi}{\partial t}. \quad (2.1)$$

Durch die Auslenkung der Teilchen ergeben sich lokale Dichteunterschiede im Ausbreitungsmedium, welche wiederum zu lokalen Druckunterschieden führen. Da der Druck als makroskopische Größe verhältnismäßig einfach erfassbar ist werden im Allgemeinen

Druckschwankungen zur Beschreibung der Ausbreitung akustischer Wellen herangezogen. Der Druck $p_{abs,i}$ an einem beliebigen Ort innerhalb des Ausbreitungsmediums welcher von der Schallwelle durchlaufen wird kann als Summe des Umgebungsdrucks p_0 und der durch die Schallwelle hervorgerufenen Druckschwankung $p_i(t)$ aufgefasst werden:

$$p_{abs,i}(t) = p_0 + p_i(t) . \quad (2.2)$$

Bei der Ausbreitung akustischer Wellen in idealen Gasen können spezielle materialspezifische Randbedingungen einbezogen werden. In idealen Fluiden breiten sich bei der Schallpropagation aufgrund der fehlenden Formelastizität im Gegensatz zu Festkörpern einzig Longitudinalwellen aus. Beim Übergang zu realen Fluiden und der damit verbundenen Einbeziehung der Viskosität ist zusätzlich die Ausbildung viskoser Scherwellen möglich. Die entstehenden Scherwellen werden jedoch schon nach geringer Entfernung vom Fluid absorbiert, und können somit für die Objektdetektion im Fernfeld vernachlässigt werden.

Über Newton's Grundgesetz der Dynamik lässt sich die Beziehung zwischen Druck und Schallschnelle akustischer Wellen in Gasen aufstellen. Die allgemeine Bewegungsgleichung für die dreidimensionale Ausbreitung akustischer Wellen wird auch Schallfeldgleichung genannt und ist definiert als:

$$-\nabla p = \rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} . \quad (2.3)$$

Der Zusammenhang zwischen der räumlichen Änderung der Schallschnelle v und der zeitlichen Änderung des Drucks p ergibt sich durch Einsetzen der thermodynamischen und kinematischen Beziehungen zwischen den Feldgrößen zu:

$$-div \vec{v} = \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} . \quad (2.4)$$

Hierbei bezeichnet K den Kompressionsmodul des Ausbreitungsmediums welcher definiert ist als:

$$K = -V \frac{\Delta p}{\Delta V} , \quad (2.5)$$

und die Änderung des Drucks bei einer Kompression des Volumens um ΔV beschreibt. Die Kombination von (2.3) und (2.4) liefert schließlich den als Wellengleichung bekannten Ausdruck:

$$\nabla^2 p = \frac{\rho_0}{K} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} . \quad (2.6)$$

Die Phasengeschwindigkeit c mechanischer Schwingungen in Gasen ist definiert als:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (2.7)$$

wobei γ den Adiabatenexponenten des Ausbreitungsmediums, R die universelle Gaskonstante und M die Molare Masse des Ausbreitungsmediums bezeichnen. Besonders aus der Umformung mit Hilfe des idealen Gasgesetzes wird deutlich, dass die Phasengeschwindigkeit lediglich durch die Temperatur, als einzig nicht konstante Größe, beeinflusst wird. Einsetzen von (2.7) in (2.6) liefert die Wellengleichung in Abhängigkeit von der Phasengeschwindigkeit:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (2.8)$$

Aufgrund der, im Vergleich zur Überwachten Entfernung, sehr kleinen Apertur akustischer Sensoren sowie der bereits erwähnten Wirbelfreiheit des Schallfelds kann vereinfachend eine ebene Wellenausbreitung angenommen werden. Für die eindimensionale Ausbreitung einer ebenen akustischen Welle in x-Richtung erhält man:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (2.9)$$

Mit Verwendung der Kreiswellenzahl k und unter der Annahme einer harmonisch angeregten Druckschwankung p verändert sich die Wellengleichung zu:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - k^2 p = 0, \quad (2.10)$$

mit:

$$k = \frac{\omega}{c}, \quad (2.11)$$

und

$$p(t) = e^{j\omega t}. \quad (2.12)$$

Die allgemeine Lösung für den Ausdruck (2.10) setzt sich aus einer Linearkombination der hin- und rücklaufenden akustischen Welle zusammen zu:

$$p(x, t) = A \cdot e^{j(\omega t - kx)} + B \cdot e^{j(\omega t + kx)}. \quad (2.13)$$

Für die Berechnung des Streufelds soll lediglich die abgestrahlte Welle berücksichtigt werden. Demzufolge ergibt sich die Beziehung für die Ausbreitung einer akustischen Kompressionswelle analog zum Ausbreitungsterm elektromagnetischer Transversalwellen zu:

$$p(x, t) = A \cdot e^{j(\omega t - kx)}. \quad (2.14)$$

Einen vor allem für die schallbasierte Detektion von Objekten wichtigen Gesichtspunkt der akustischen Wellenpropagation stellt die Dämpfung der Welle durch das Ausbreitungsmedium dar, da sie direkten Einfluss auf die effektiv überwachbare Entfernung des Systems ausübt.

Bei der Betrachtung der Dämpfung muss zwischen nicht-dissipativen Vorgängen, wie Beugung und Streuung, und Absorption unterschieden werden. Bei der Absorption wird der Welle zum Einen durch Viskositäts- und Wärmeleitungseffekte, zum anderen durch die Anregung intramolekularer Schwingungen der Luftmoleküle Energie entzogen. Die erstgenannte klassische Absorption α_V wandelt die kinetische Energie der angeregten Teilchen aufgrund der inneren Reibung des Mediums in Wärme um und leitet Diese ins umgebende Medium ab. Der Absorptionskoeffizient ergibt sich zu:

$$\alpha_V = \frac{1}{2} \frac{\left[\frac{4}{3} \eta + \lambda \left(\frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_P} \right) \right] \omega^2}{\rho_0 c_0^3}, \quad (2.15)$$

mit ρ_0 und c_0 als Dichte des Mediums bzw. Phasengeschwindigkeit der Welle im Medium bei 0° C, η als dynamische Viskosität des Mediums und c_V und c_P als isochore bzw. isobare spezifische Wärmekapazität des Mediums. Anhand der quadratischen Kreisfrequenz in Beziehung (2.15) ist ersichtlich, dass auch die Frequenz der sich ausbreitenden Welle einen deutlichen Einfluss auf deren Dämpfung ausübt.

Im Gegensatz dazu entsteht der Energieverlust bei der sogenannten molekularen Luftabsorption α_L durch die Anregung von Schwingungen der einzelnen Atome eines Moleküls entsprechend der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade und lässt sich beschreiben als:

$$\alpha_L = \frac{1}{2} \frac{2\pi \cdot 10^{-5} (0,81 + 0,022t) \cdot \tau f^2}{1 + 4\pi^2 \tau^2 f^2}, \quad (2.16)$$

wobei τ die Relaxationszeit des Mediums bezeichnet. Die molekulare Dämpfung wird vor Allem durch die Anwesenheit von Wassermolekülen hervorgerufen, weshalb die Luftfeuchtigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Absorption akustischer Wellen in Luft ausübt.

Die Dämpfung von Druckwellen in Gasen ΔL setzt sich somit aus den viskosen bzw. durch die Wärmeleitung hervorgerufenen Anteilen α_V und den durch intramolekulare Schwingungen erzeugten Verlusten α_L zusammen und folgt einem exponentiellen Verlauf nach:

$$\Delta L = e^{-(\alpha_V + \alpha_L)\Delta x} . \quad (2.17)$$

Kombiniert man nun (2.14) und (2.17) so ergibt sich die Ausbreitungsgleichung für akustische Wellen in Gasen unter Berücksichtigung der Dämpfung durch das Ausbreitungsmedium zu:

$$p(x, t) = A \cdot e^{-(\alpha_V + \alpha_L)x} \cdot e^{j(\omega t - kx)} . \quad (2.18)$$

Abbildung 5 veranschaulicht den Einfluss der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Dämpfung des Schalls bei einer Ausbreitung in Luft bei einer Anregungsfrequenz von 40 kHz.

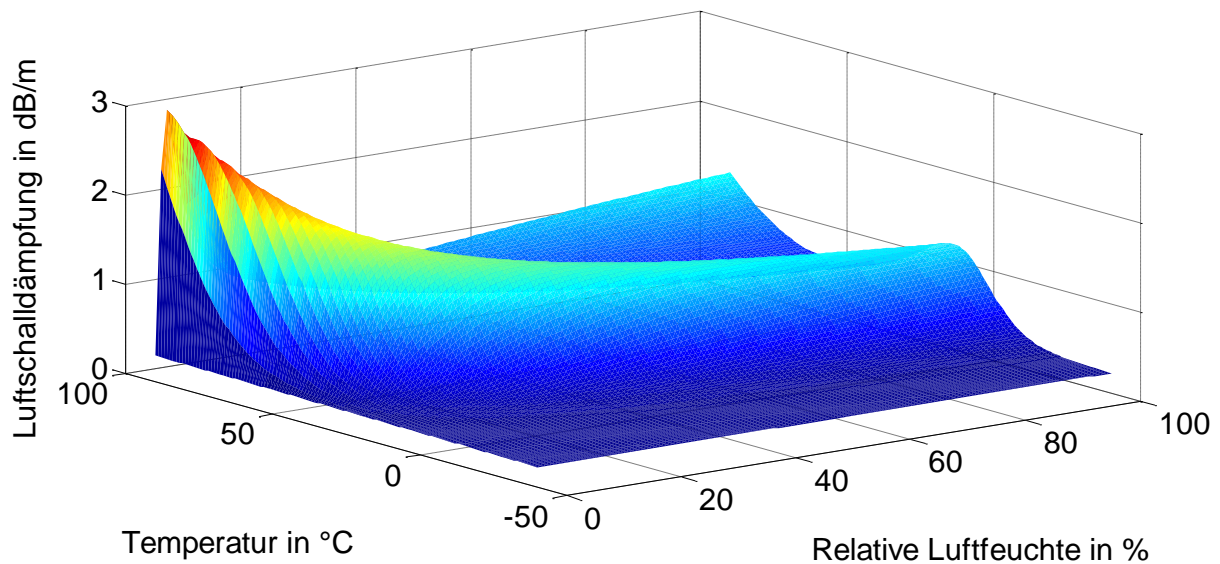


Abbildung 5: Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Luftschalldämpfung durch Absorption [34]

2.2 Abbildung von Objekten mit Ultraschallsystemen

Die Gewinnung von Objektinformationen aus den ausgesendeten Schallwellen kann auf verschiedene Arten durchgeführt werden und stellt in Abhängigkeit vom verwendeten Verfahren unterschiedlich hohe Anforderungen an die verwendete Hardware bzw. die signaltheoretische Analyse. Im vorliegenden Fall wurde die Objektszene mittels Laufzeitmessung nach dem Impuls-Echo-Verfahren untersucht, welches in beiden Bereichen mit moderatem Aufwand realisiert werden kann.

2.2.1 Eigenschaften von Abbildungssystemen

Als Maß für die Güte bildgebender Systeme wird in der Regel dessen Auflösungsvermögen herangezogen. Das Auflösungsvermögen unterteilt sich dabei in zwei charakteristische Parameter. Das axiale Auflösungsvermögen bezeichnet dabei die Fähigkeit des Systems zwei Punktstreuer mit unterschiedlichem Abstand in Ausbreitungsrichtung der Welle zu trennen, wohingegen das laterale Auflösungsvermögen die Fähigkeit des Systems beschreibt zwei Punktstreuer in einer Ebene orthogonal zur Ausbreitungsrichtung der Welle zu unterscheiden.

Die axiale Auflösung des Systems ist in erster Linie von dessen nutzbarer Bandbreite Abhängig. Ideale Abbildungssysteme besitzen eine unendliche Bandbreite, wodurch die Echoimpulse im Reflexionsprofil Dirac-Pulsen entsprechen. Aus diesem Grund besitzen ideale Abbildungssysteme eine axiale Auflösung von $\Delta f = 0$, welche das theoretisch maximal erreichbare Auflösungsvermögen in axialer Richtung darstellt. Reale Systeme, und Ultraschallsysteme im Besonderen, besitzen nur eine sehr begrenzte Bandbreite B :

$$B = f_o - f_u . \quad (2.19)$$

Als direkte Folge besitzen die von solchen Systemen gesendeten bzw. empfangenen Pulse eine endliche Anstiegs- bzw. Abfallzeit, wodurch deren Auflösungsvermögen beschränkt wird. Als Beispiel soll ein ideales, gaussförmiges Frequenzspektrum für das abbildende System angenommen werden, welches beschrieben wird durch:

$$S(f) = e^{-\frac{4 \ln 2 (f-f_M)^2}{B^2}} . \quad (2.20)$$

Für Systeme mit symmetrischen Fourierspektren bezüglich einer Mittenfrequenz f_m entspricht diese dem Betragsmaximum des Spektrums. Systeme welche diese Randbedingung nicht erfüllen, oder von starkem Rauschen überlagert sind können bei einer Bestimmung der Mittenfrequenz auf diese Art deutliche Abweichungen von der tatsächlichen Mittenfrequenz zur Folge haben. In solchen Fällen können durch die Verwendung statistischer Ansätze für die Bestimmung der Mittenfrequenz bessere Ergebnisse erhalten werden. So soll hier die Schwerpunktfrequenz, also der Mittelwert des Leistungsdichtespektrums als Mittenfrequenz herangezogen werden:

$$f_M = \frac{\int_0^\infty f |F(f)|^2 df}{\int_0^\infty |F(f)|^2 df} . \quad (2.21)$$

Abbildung 6 zeigt ein beispielhaftes Frequenzspektrum für einen Ultraschallwandler mit einer Mittenfrequenz von 40kHz und einer Bandbreite von 2kHz.

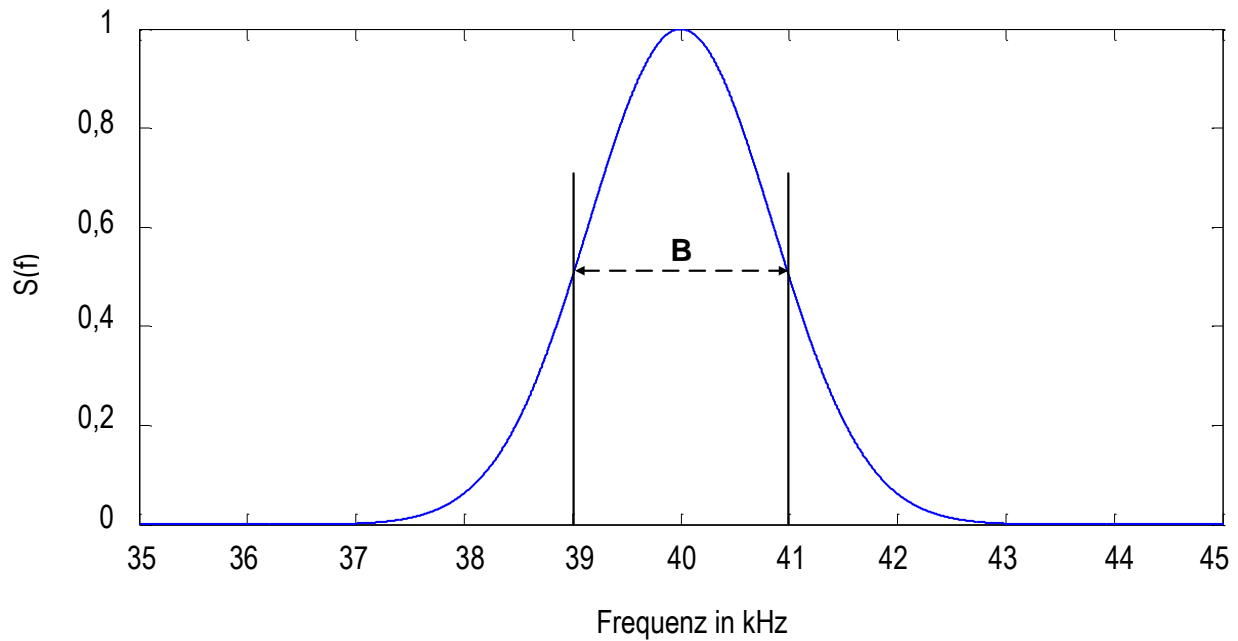


Abbildung 6: Bandbreite eines Abbildungssystems

Die Bandbreite eines realen Abbildungssystems wird definiert durch die Frequenzspanne bei der die Frequenzpunkte beiderseits des Maximalbetrags des Leistungsdichtespektrums um 6dB, also gerade auf die Hälfte des Maximalbetrags abgefallen sind.

Die Einhüllende eines geträgerten Ultraschallpulses zum durch Gleichung (2.20) beschriebenen Frequenzspektrum ergibt sich nach Transformation in den Zeitbereich zu:

$$s(t) = e^{-\frac{\pi^2 B^2 t^2}{4 \ln 2}}. \quad (2.22)$$

Abbildung 7 zeigt einen geträgerten Ultraschallpuls und dessen Einhüllende für einen Ultraschallwandler mit einer Mittenfrequenz von 40kHz und einer Bandbreite von 2kHz.

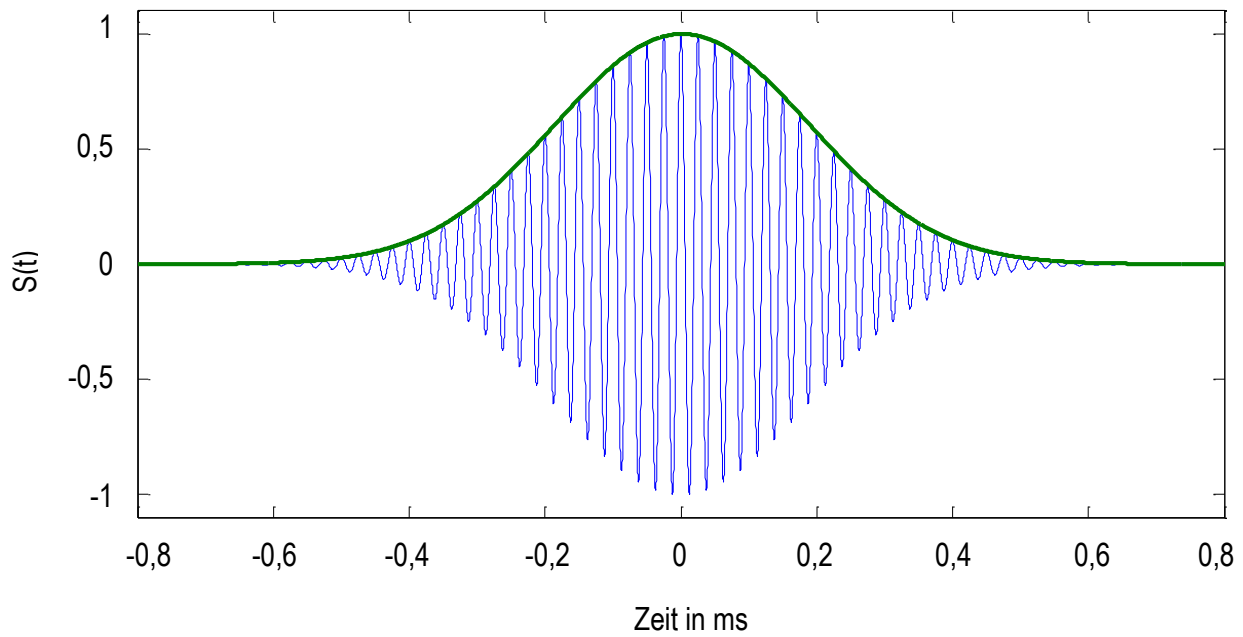


Abbildung 7: Einhüllende eines Abbildungssystems

Das axiale Auflösungsvermögens δ_{ax} eines Abbildungssystems hängt in erster Linie von der Ausdehnung des Sendepulses ab. Die Ausdehnung des Sendepulses wird oftmals durch die Bestimmung der Zeitdauer zwischen den Punkten beidseitig der Mittenfrequenz ermittelt an denen die Leistung um 6dB gegenüber dem Betragsmaximum abgefallen ist. Für die durch Gleichung (2.22) beschriebene Einhüllende ergibt sich diese Zeitdauer zu:

$$t_{Puls} = \frac{4 \ln 2}{\pi \cdot B}. \quad (2.23)$$

Das axiale Auflösungsvermögen entspricht der Distanz, bei der sich beide Pulse am -6dB-Punkt überlagern. Diese Distanz stellt den Grenzfall dar, bei dem die Differenz Δ_{Amp} der Gesamteinhüllenden zu den beiden Maxima gegen Null strebt.

$$\delta_{ax} = \frac{4 \ln 2 \cdot c_0}{2\pi \cdot B}. \quad (2.24)$$

zeigt die Anordnung zweier Pulse im Abstand δ_{ax} zueinander sowie die resultierende Gesamteinhüllende für die durch Gleichung (2.22) beschriebene Einhüllende.

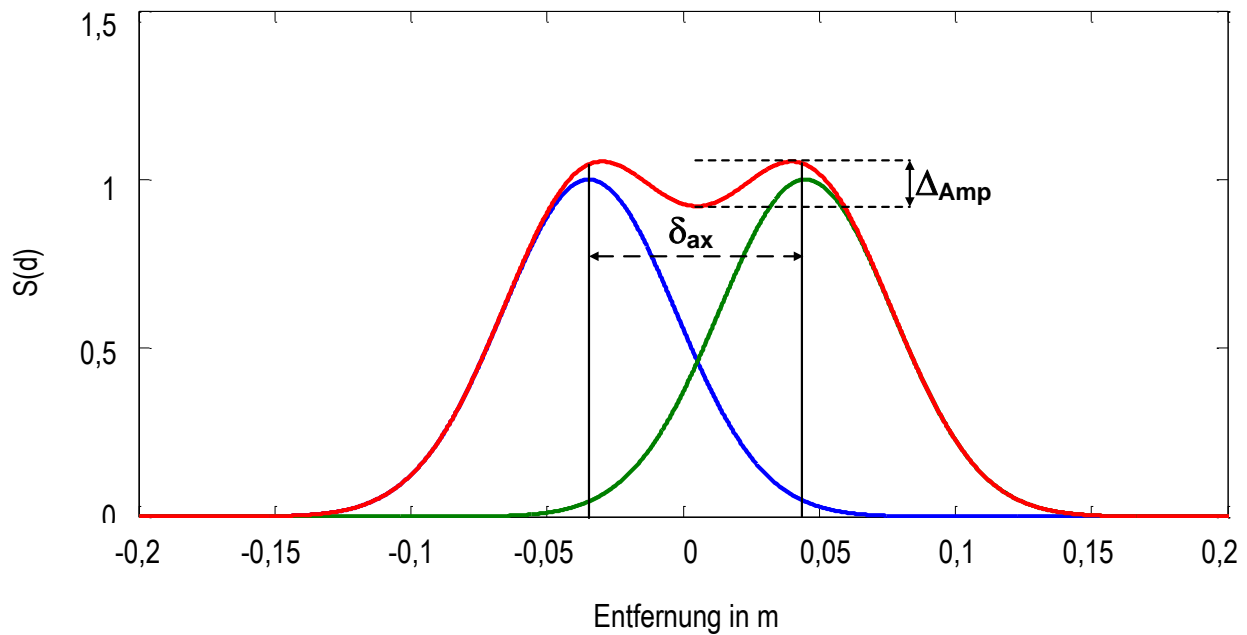


Abbildung 8: Bestimmung des Auflösungsvermögens

Der daraus resultierende Abstand entspricht also der Hälfte der -6dB-Pulsbreite und ergibt sich aus (2.23) zu:

$$\delta_{ax} = \frac{4 \ln 2 \cdot c_0}{2\pi \cdot B}. \quad (2.24)$$

2.2.2 Abstandsbestimmung durch Impuls-Echo Verfahren

Im Bereich industrieller Anwendungen für Automatisierung, Sicherheit und zerstörungsfreie Materialkontrolle stellt das Impuls-Echo-Verfahren oder auch Reflexionsschall-Verfahren das bei Weitem am häufigsten eingesetzte Verfahren dar. Das Prinzip basiert auf der Kenntnis der Phasengeschwindigkeit der akustischen Welle im verwendeten Ausbreitungsmedium. Zu Beginn einer Messung wird ein geträgerter Puls ausgesendet und anschließend die verstreichende Zeit bis zu dessen Rückkehr gemessen. Die so ermittelte Laufzeit der akustischen Welle ist über deren Phasengeschwindigkeit direkt mit der von ihr zurückgelegten Distanz verknüpft. Da die Welle um wieder empfangen werden zu können sowohl den Hinweg von der Quelle zum Objekt als auch den Rückweg zurücklegen muss ergibt sich die Distanz zwischen Sender und reflektierendem Objekt zu:

$$d = \frac{\tau \cdot c}{2} \quad (2.25)$$

Die vom Objekt reflektierte Energie unterliegt der Freiraumdämpfung und stellt nur einen Bruchteil der ursprünglich in das Medium eingekoppelten Energie dar. Die Freiraumdämpfung spielt vor allem aufgrund des nahezu punktförmigen Charakters des aktiven Sensorelements im Vergleich zur Detektionsreichweite und der daraus resultierenden, bei Ultraschallsystemen zur Umfeldüberwachung oftmals erwünschten, nahezu isotropen Ausbreitung der Welle eine gewichtige Rolle hinsichtlich der zu erreichenden Reichweite. Die vom Sensorelement ausgesendete Leistung verteilt sich auf einer in Ausbreitungsrichtung immer größer werdenden Kugeloberfläche, wodurch die Sendeleistungsdichte in Ausbreitungsrichtung abnimmt. Diese Beziehung wird beschrieben durch:

$$S_{tx}(d) = \frac{P_{tx}}{4\pi \cdot d^2} \quad (2.26)$$

Die ausgesendete Schallenergie wird an Grenzflächen unterschiedlicher Dichte in Abhängigkeit vom Rückstreuquerschnitt reflektiert. Die reflektierte Leistung ergibt sich nach:

$$P_{refl}(d) = S_{tx}(d) \cdot \sigma \quad (2.27)$$

Der reflektierte Anteil der ausgesendeten Schallwelle erfährt bei der Ausbreitung zurück zum Sensorelement erneut den Effekt der Freiraumdämpfung. Die am Sensorelement anliegende Empfangsleistung ergibt sich dadurch zu:

$$P_{rx}(d) = \frac{P_{tx} \cdot \sigma \cdot A_w}{16\pi^2 \cdot d^4} \quad (2.28)$$

Abbildung 9 zeigt den Einfluss der Freiraumdämpfung auf eine reflektierte Schallwelle in Ausbreitungsrichtung.

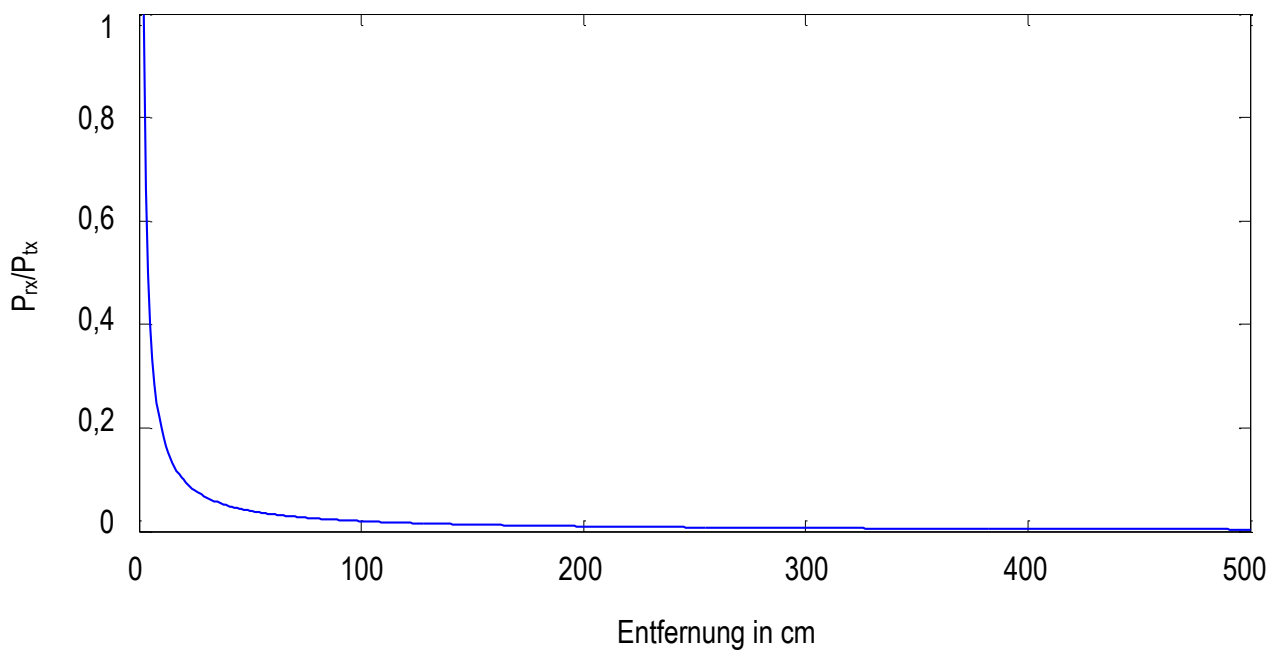


Abbildung 9: Freiraumdämpfung in Ausbreitungsrichtung

Systeme zur Impuls-Echo-Abbildung von Objekteigenschaften bestehen bei monostatischem Betrieb aus einem einzelnen sowohl für den Sende- als auch den Empfangsvorgang verwendeten Schallwandler, einer digitalen Sendestufe zur Signalgenerierung, einem analogen Empfangszweig, bestehend aus Bandpassfilter, Empfangsverstärker und Analog-Digital-Umsetzer sowie der nachgeschalteten Signalanalyse in analoger oder digitaler Form. Das Blockschaltbild in Abbildung 10 veranschaulicht den Aufbau des Systems.

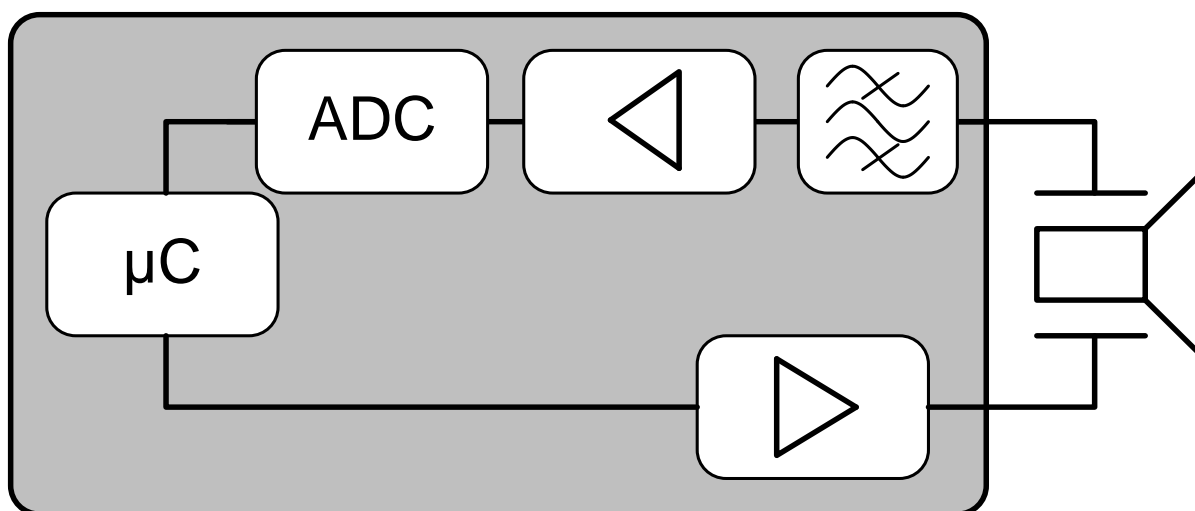


Abbildung 10: Schematischer Aufbau eines Impuls-Echo-Systems

Sendeseitig ist in der Regel keine Digital-zu-Analog-Wandlung notwendig, da die diskreten Anregepulse aufgrund der im Allgemeinen sehr begrenzten Bandbreite des Schallwandlers in sinusförmige Schwingungen übergehen.

2.2.3 Hüllkurvendemodulation

Das vom Objekt reflektierte Echo kann als auf die Trägerwelle aufmodulierte Information aufgefasst werden. Mittels der Hüllkurvendemodulation kann die in amplitudenmodulierten, hochfrequenten Signalen enthaltene Information zurückgewonnen werden. Die Demodulation des hochfrequenten Signals besteht aus einer Gleichrichtung mit anschließender Tiefpassfilterung und kann sowohl analog als auch digital durchgeführt werden. Ein empfangenes analoges Echosignal kann beschrieben werden als:

$$e(t) = [A(t) \cdot M(t)] \cdot \cos(\omega t) , \quad (2.29)$$

wobei $A(t)$ den zeitlichen Verlauf der Amplitude der Trägerwelle und $M(t)$ die aufmodulierte Information bezeichnet. Die Hüllkurvendemodulation stellt einen elementaren Signalverarbeitungsschritt für Ultraschallsysteme dar und findet vielfältige und vereinzelt auch skurrile Anwendung wie z.B. zur Bestimmung der Knusprigkeit von Keksen [35]. Trotz der relativ simplen Operation werden weiterhin Untersuchungen zur Verbesserung bzw. Weiterentwicklung des Verfahrens und der damit verbundenen Hardware durchgeführt [36], [37].

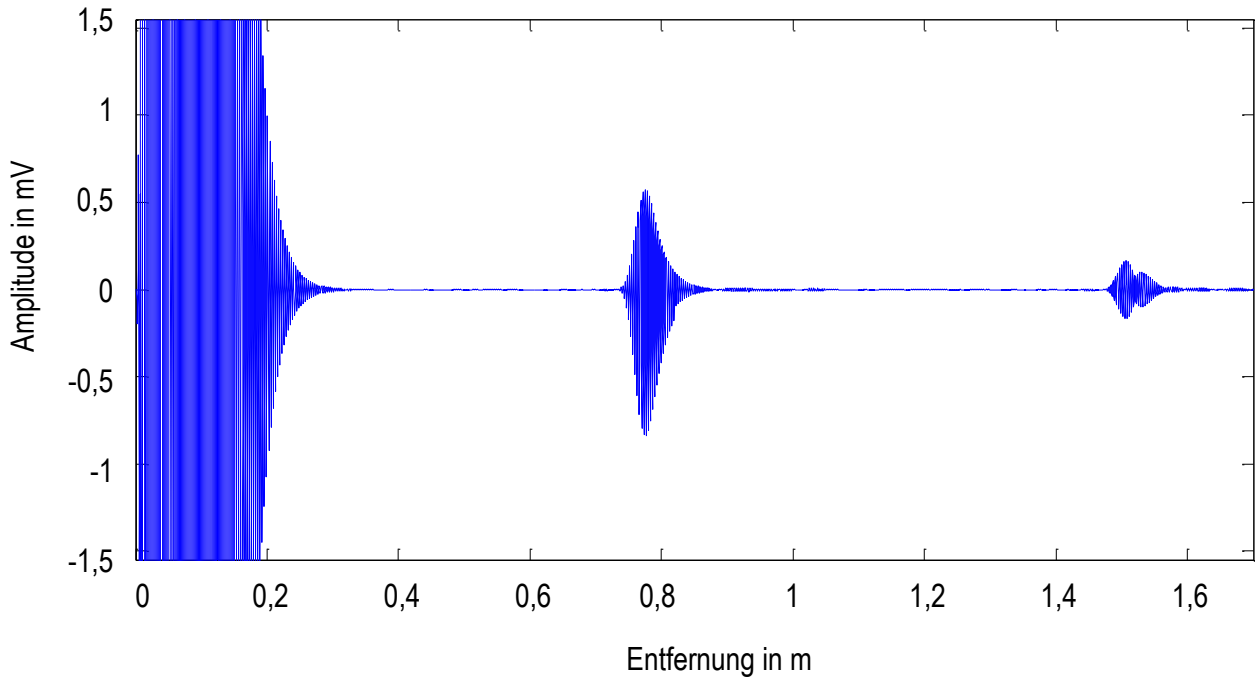


Abbildung 11: Analoges Echoprofil einer Ultraschallmessung

Das Analogsignal wird zunächst analog über einen Zweiweggleichrichter oder digital durch eine Betragsbildung des abgetasteten Signals gleichgerichtet und ergibt sich zu:

$$|e(t)| = |A(t) \cdot M(t) \cdot \cos(\omega t)| \quad (2.30)$$

Die Hüllkurve wird schließlich durch die Unterdrückung der hochfrequenten Anteile des Echoprofils gebildet. Die Tiefpassfilterung ergibt sich durch Multiplikation der Fourier-Transformierten des empfangenen Profils mit der komplexen Filterfunktion und anschließender Rücktransformation des erhaltenen Produkts:

$$y(t) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{e(t)\} \cdot H(j\omega)\} \quad (2.31)$$

Die Objektdetektion wird über einen Schwellwertentscheider realisiert. Die Kompensation des Pfadverlusts des empfangenen Signals kann zum einen durch die Verwendung eines entsprechend angepassten, entfernungsabhängigen Profils für die Vergleichsschwelle und zum anderen durch eine laufzeitabhängige Empfangsverstärkung bei konstanter Detektionsschwelle realisiert werden.

Abbildung 12 zeigt das Analogsignal aus

Abbildung 11 nach der Demodulation.

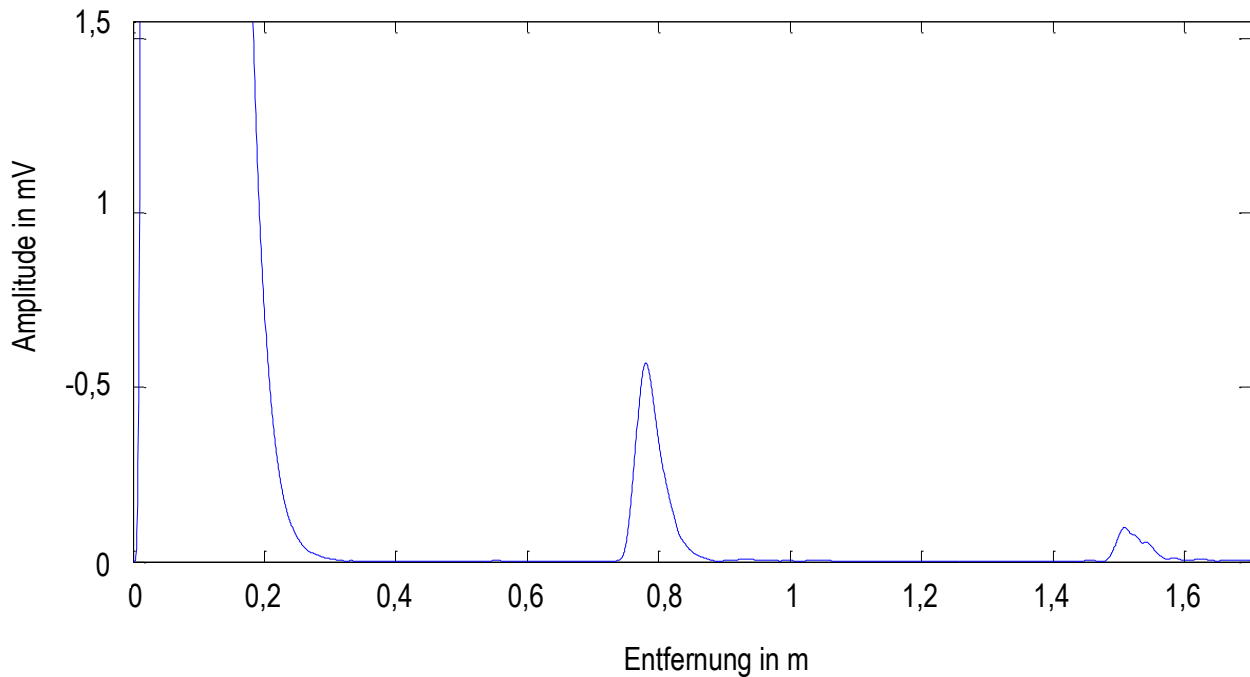


Abbildung 12: Hüllkurve des Echoprofils

2.2.4 Abbildung von Objektszenen durch Trilateration

Als Lateralation werden im Allgemeinen Verfahren bezeichnet die mit Hilfe von gemessenen Distanzen und bekannten Stützpunkten die Position von Objekten ermitteln. Die bekanntesten Verfahren dieser Kategorie stellen die Tri- und die Multilateration dar. Letztere verwendet jedoch keine direkt gemessenen Distanzen sondern Distanzdifferenzen und die daraus gewonnenen Hyperbeln zur Objektlokalisierung. Die Trilateration verwendet die gemessenen Laufzeiten bzw. Distanzen von drei oder mehr Wandlern mit bekannter Position zur Bestimmung der Objektposition. Dabei entspricht die minimale Anzahl N der zur eindeutigen Bestimmung der Position notwendigen Wandler:

$$N = \dim + 1 \quad (2.32)$$

wobei \dim die Dimension der abzubildenden Lokalisation bezeichnet. Demzufolge wird ein Minimum von drei Wandlern für eine eindeutige zweidimensionale Bestimmung der Objektposition benötigt, woraus sich auch die Bezeichnung Trilateration ableitet. Die Positionsbestimmung durch Trilateration stellt eines der am häufigsten eingesetzten Verfahren für Systeme mit mehreren räumlich verteilten Sensoren dar. Das bekannteste Beispiel hierfür

ist wohl das Global Positioning System [38] . Aufgrund seiner elementaren Bedeutung für die Lokalisierung wurde das Verfahren auch in der jüngeren Vergangenheit weiter untersucht, wie in den Publikationen [39], [40], [41] und [42] nachzulesen ist.

Analytisch erfolgt die Lokalisierung bei der direkten Trilateration über die Ermittlung des Schnittpunkts der Kreise deren Radien den von den Wandlern aufgenommenen Distanzen und deren Mittelpunkte den Wandlerpositionen entsprechen. Man erhält also ein Gleichungssystem der Form:

$$\begin{aligned} r_1^2 &= (x - x_{M1})^2 + (y - y_{M1})^2 \\ r_2^2 &= (x - x_{M2})^2 + (y - y_{M2})^2 \\ r_3^2 &= (x - x_{M3})^2 + (y - y_{M3})^2 \end{aligned} \quad (2.33)$$

Ein Auflösen des Gleichungssystems nach den Koordinaten des Schnittpunkts liefert:

$$y = \frac{\Delta_{r21}^2 + \Delta_{yM12}^2 + x \cdot \Delta_{xM21} + \Delta_{xM12}^2}{\Delta_{yM12}}, \quad (2.34)$$

und

$$x = \frac{\Delta_{r32}^2 + \Delta_{yM23}^2 + y \cdot \Delta_{yM32} + \Delta_{xM23}^2}{\Delta_{xM23}}, \quad (2.35)$$

mit

$$\Delta_{nij} = (n_i - n_j) \quad (2.36)$$

In aktuell eingesetzten Abstandswarnsystemen werden zusätzlich zu den direkt durch die Wandler detektierten Objektreflexionen auch die Querechos ausgewertet welche sich aus den indirekten Übertragungswegen zwischen den einzelnen Wandlern ergeben. Die so ermittelten Laufzeiten entsprechen der Summe der Distanzen des reflektierenden Objekts zu beiden beteiligten Sensoren. Für die Lokalisation durch Trilateration ergeben sich aus den empfangenen Laufzeiten also Ellipsen, deren Brennpunkte jeweils durch die verwendeten Wandlerpaare gebildet werden. Die Ellipsen ergeben sich nach:

$$y = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left((x_{Ti} - x_{E,ij})^2 + (y_{Ti} - y_{E,ij})^2\right)} \cdot \left(1 - \frac{(x - x_{E,ij})}{\left(\frac{d}{2}\right)}\right) + y_{E,ij}, \quad (2.37)$$

mit

$$x_{E,ij} = \frac{x_{Ti} + x_{Tj}}{2} \quad (2.38)$$

und

$$y_{E,ij} = \frac{y_{Ti} + y_{Tj}}{2} \quad (2.39)$$

Die Bestimmung der Position des reflektierenden Objekts wird also über die Lösung eines Gleichungssystems bestehend aus den nicht redundanten Kreis- bzw. Ellipsengleichungen realisiert. Für eine Wandleranordnung mit N Sensoren ergeben sich aus der Kombinatorik

$$I = \frac{(N + 2 - 1)!}{2! (N - 1)!}, \quad (2.40)$$

nicht redundante Übertragungswege mit N Kreis- und I-N Ellipsengleichungen.

Abbildung 13 zeigt das Ortungsergebnis einer Lokalisierung durch analytische Trilateration als den sich ergebenden Schnittpunkt für eine Wandleranordnung mit vier Elementen und einer Objektszene mit einem Punktstreuer.

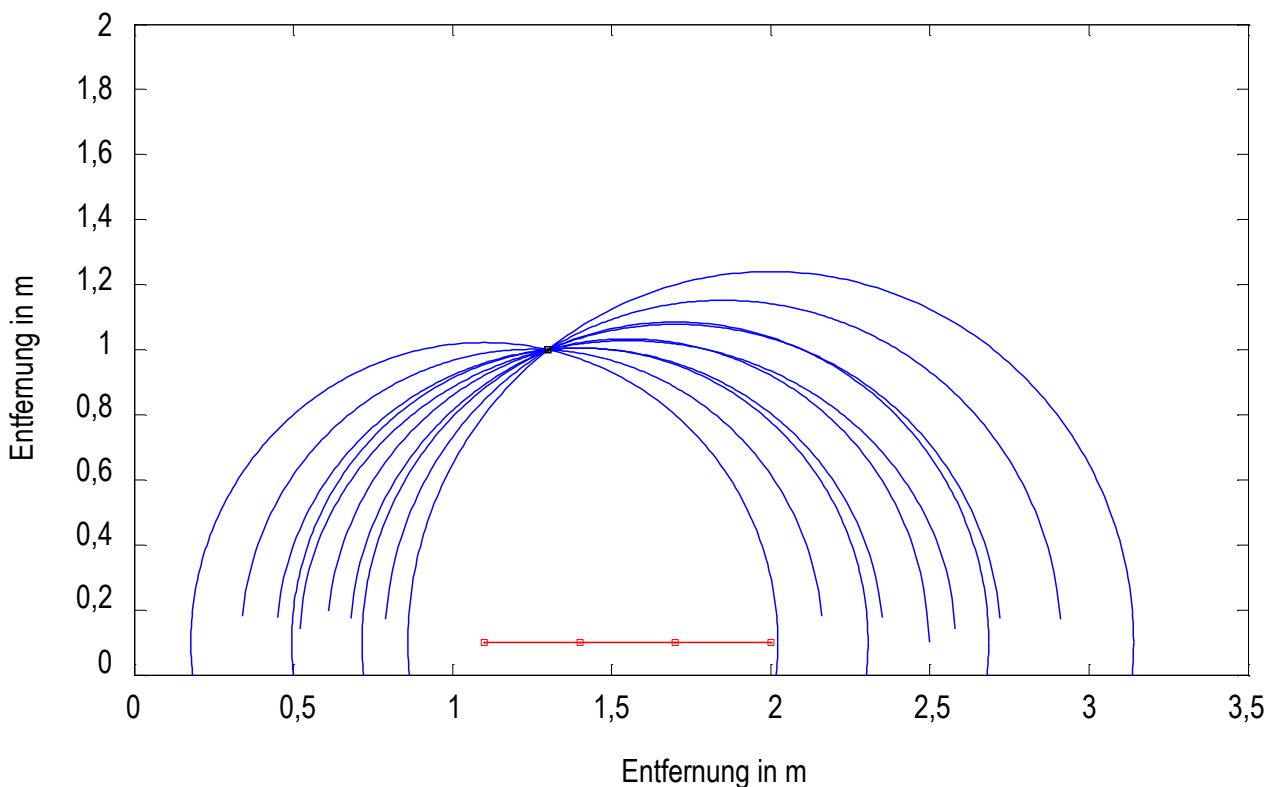


Abbildung 13: Simulation einer analytischen Trilateration für einen Punktstreuer

Die Zuordnung der gemessenen Laufzeiten zu den tatsächlichen Objekten stellt beim analytischen Ansatz vor allem in Situationen mit mehreren Objekten im Detektionsbereich ein Problem dar. Schon bei zwei reflektierenden Objekten ergibt sich eine Vielzahl möglicher Kombinationen für die Bildung der beiden Gleichungssysteme. Objekte die sich im Randbereich der Wandleranordnung befinden und nur von einem Teil der Sensoren beleuchtet werden erschweren die Zuordnung zusätzlich, da sich in diesem Fall kein vollständiges Gleichungssystem ergibt und in ungünstigen Fällen mehrere Objekte zu einem einzigen zusammenfallen können. Unter den genannten Voraussetzungen kann es von Vorteil sein einen alternativen Ansatz zu wählen.

2.2.5 Abbildung von Objektszenen durch laufzeitrichtige Addition

Alternativ zur analytischen Bestimmung des gemeinsamen Schnittpunkts der gemessenen Distanzen kann die Lokalisierung auch über einen laufzeitrichtigen, additiven Ansatz durchgeführt werden. Das Verfahren entspricht dabei in seinen Grundzügen dem in [43], [44] und [45] beschriebenen Ansatz, verzichtet jedoch auf die Auswertung der Signalphase und summiert lediglich die Amplitudeninformation. Der zu überwachende Bereich wird hierbei durch einen gerasterten Bildraum repräsentiert. Nach erfolgter Messung werden die Signale nach:

$$P(x, y) = \sum e_{ij} \left(\frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}}{c} \right), \quad (2.41)$$

laufzeitrichtig auf den Bildpunkten summiert und ergeben somit direkt eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Position der detektierten Objekte. Verzichtet man auf eine Normierung der Signale so kann aus der Summe der Amplitudeninformation direkt auf den Rückstreuquerschnitt der Objekte geschlossen werden.

Abbildung 14 zeigt das Ergebnis der laufzeitrichtigen, additiven Lokalisierung für eine Situation mit zwei Punkstreuern.

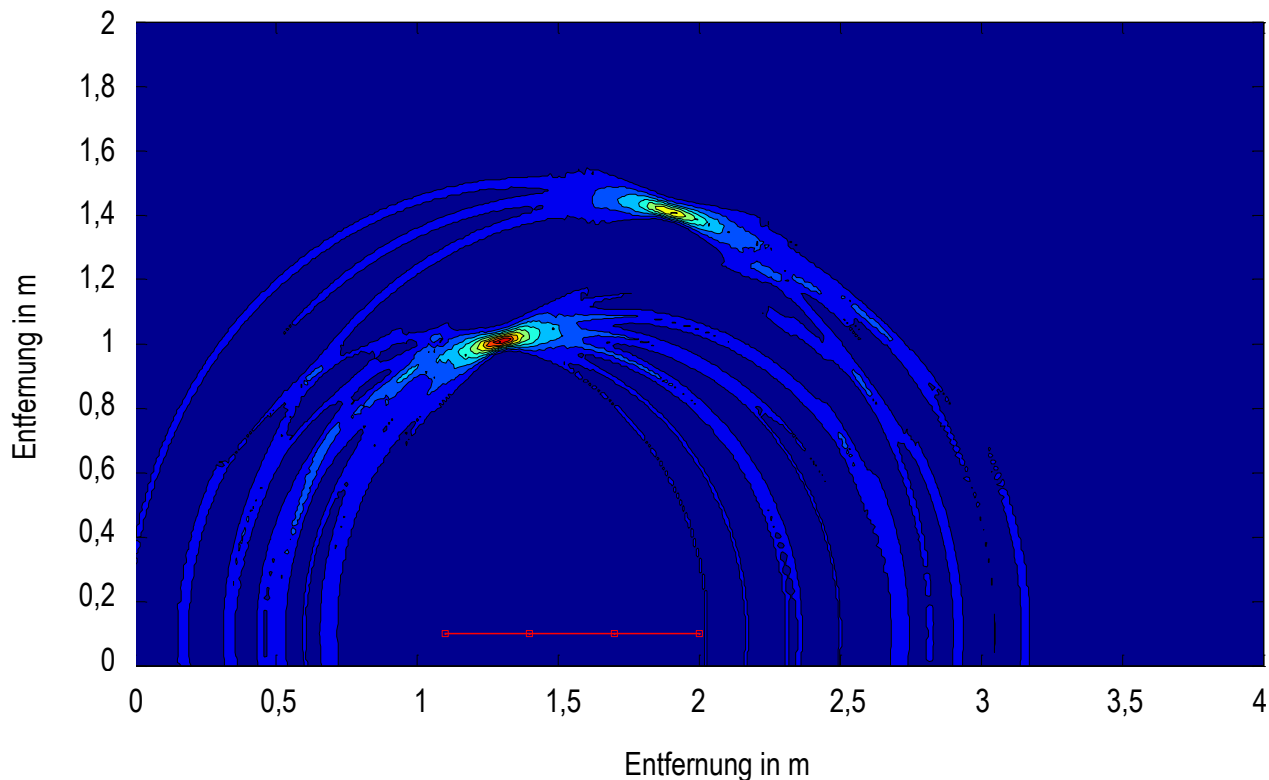


Abbildung 14: Simulation einer laufzeitrichtigen, additiven Lokalisierung

2.2.6 Abbildung von Objektszenen durch Umfeldkarten

Umfeldkarten stellen die konsequente Weiterverwendung des in Abschnitt 2.2.5 beschriebenen Verfahrens dar. Hierbei werden die von den Sensoren aufgenommenen Informationen bzw. Laufzeiten unter Einbeziehung zusätzlicher Informationen wie z.B. der Fahrzeugbewegung zeitlich kombiniert.

Der überwiegende Großteil heutzutage eingesetzter Umfeldmodelle nutzt hierbei ähnlich wie das Verfahren der Objektortung durch laufzeitrichtige Addition einen gitterbasierten Ansatz. In der Regel ist das Gitter bzw. die Karte fahrzeugfest, besitzt also einen gemeinsamen Ursprung mit dem Fahrzeugkoordinatensystem.

Da die heutzutage im industriellen Umfeld eingesetzten Ultraschallsysteme zur Kollisionsvermeidung in der Regel lediglich die Laufzeit detektierter Objekte liefern, wird diese Information ohne eine Gewichtung durch z.B. Amplitudeninformation in binärer Form

in das Raster der Karte aufgenommen. Die Sensorinformationen werden entsprechend der Fahrzeugbewegung ins Raster übernommen. Bei fahrzeugfesten Modellen bedeutet dies eine entsprechende Verschiebung der im Raster abgelegten Information.

Um eine verlässliche Aussage über die tatsächliche Belegung der einzelnen Zellen treffen zu können wurden verschiedene Ansätze entwickelt wie zum Beispiel das Occupancy Grid [46] oder die Fusion von getrackten Objektlisten und Kartendaten [47].

Eines der bekanntesten Verfahren hierzu stellt die Evidenz-Theorie von Dempster und Schaefer dar, die generell bei allen Umfeldmodellen, jedoch vor allem bei Occupancy Grids zum Einsatz kommt. Der Evidenzansatz beschreibt dabei eine Erweiterung der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Zusätzlich zur Plausibilität wird hierbei noch ein Maß für den Grad des Vertrauens einer Informationsquelle hinzugezogen [48].

3 Mustererkennung

Der Begriff der Mustererkennung fasst Fragestellungen zusammen, welche die automatische Klassifizierung von Objekten oder Ereignissen der Umwelt betreffen [49]. Unter Mustern werden dabei in der Regel charakteristische Verläufe physikalischer Größen aufgefasst. Die Klassifizierung erkannter Objekte bietet in der Regel einen Gewinn an Robustheit für die auf den Sensorinformationen basierende, nachgelagerte Funktion, bzw. macht einige Funktionen auch überhaupt erst möglich und wird heutzutage in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche eingesetzt. Hierbei werden je nach eingesetztem Sensorkonzept unterschiedliche physikalische Eigenschaften der Objekte verwendet, um diese einer Objektkategorie zuzuordnen. Die Verfahren der Mustererkennung werden dabei in syntaktische [50], [51], statistische [52], [53] und strukturelle [54], [55] Verfahren unterteilt.

So wird bei aktuellen Radarsystemen durch eine Auswertung der Dopplerinformation eine Unterscheidung zwischen statischen und dynamischen Zielen durchgeführt, um je nach Funktionsausprägung relevante von irrelevanten Zielen zu trennen, und/oder eine Prädiktion der Trajektorien der dynamischen Ziele z.B. anhand eines Kalmanfilters durchzuführen. Im Bereich der Kamerasysteme stellt die Objektklassifizierung eine Grundvoraussetzung für die häufig eingesetzten Funktionen zur Qualitätskontrolle oder mit sortierenden Aufgaben dar. Hierbei werden im Allgemeinen Referenzbilder mit dem aktuell aufgenommen Bild über zweidimensionale Korrelationsalgorithmen verglichen, und die belichteten Objekte den jeweils vorhandenen Objektklassen zugeordnet.

Die Mustererkennung setzt sich aus den drei Hauptverfahrensschritten Vorverarbeitung, Merkmalsextraktion und Klassifizierung zusammen.

3.1 Vorverarbeitung

Um die Erkennung relevanter Muster zu verbessern werden die aufgenommen Rohdaten in der Regel dem Prozessschritt der Vorverarbeitung unterzogen. Hierbei werden die aufgenommen Rohsignale gefiltert um unerwünschte und irrelevante Signalanteile zu unterdrücken und im besten Fall komplett aus der Rohinformation zu entfernen. Als Filter kommt hierbei eine Vielzahl der in der digitalen Datenverarbeitung eingesetzten Algorithmen wie z.B. Hoch-, Tief und Bandpassverfahren im Zeit- und Frequenzbereich zum Einsatz. Ziel der Vorverarbeitung ist die Maximierung des Signal-zu-Rauschabstands des zu detektierenden

Musters. Die so aufbereiteten Daten stellen dabei den Ausgangspunkt für alle nachfolgenden Schritte dar, weshalb die Vorverarbeitung mit besonderer Sorgfalt durchgeführt werden muss.

3.2 Merkmalsextraktion

Die Merkmalsextraktion stellt den nächsten Prozessschritt in der Signalverarbeitungskette dar, dessen Hauptaufgaben in der Gewinnung der charakteristischen Merkmale der zu detektierenden Muster, sowie in der Reduktion der anfallenden Datenmenge bestehen. Charakteristische Merkmale können hierbei sowohl einzelne Symbole oder auch Symbolketten, welche einem Signal z.B. per Phasen-, Amplituden oder Frequenzmodulation aufgeprägt wurden als auch charakteristische Amplitudenverläufe analoger Rohdaten oder Bilder sein. Die Bestimmung der relevanten Merkmale hängt dabei maßgeblich von dem zu Grunde liegenden physikalischen Effekt ab (Spannungspegel und/oder Verlauf bei elektrischen Signalen, Helligkeit und/oder Farbinformation bei Kameraaufnahmen, etc.). Bei der Untersuchung der vorverarbeiteten Daten auf die charakteristischen Merkmale hin, kommen heutzutage durch die hohe Verfügbarkeit leistungsfähiger Hardware Großteils numerische Verfahren zum Einsatz.

Die eingesetzten numerischen Verfahren werden hierbei nach ihrem jeweils relevanten Signalbereich in Zeit- bzw. Bildverfahren und Spektralverfahren eingeordnet. Die Überführung von Signalen aus dem Zeit- bzw. Bildbereich in den Frequenzbereich durch Transformationsoperationen wie z.B. die diskrete Fouriertransformation macht dabei in vielen Fällen eine sichere Identifikation der charakteristischen Merkmale erst möglich.

Im Rahmen der Aufbereitung der Eingangsdaten werden diese in der Regel in eine Parameterdarstellung überführt um eine Klassifizierung der erfassten Informationen zu ermöglichen. Die Dimension des so generierten Parameterraums entspricht dabei der Anzahl der zur Klassifizierung benötigten Merkmale und sollte mit Hinblick auf die Systemperformance so niedrig wie möglich gewählt werden. Ein bekanntes, und vor allem im Bereich der Bildverarbeitung sehr häufig eingesetztes Verfahren zur Merkmalsextraktion stellt die Hough-Transformation dar. Aufgrund der großen Bedeutung des Hough-Algorithmus für die vorliegende Arbeit, soll Dieser nachfolgend genauer erläutert werden.

3.2.1 Hough Transformation

Die Hough-Transformation bezeichnet ein robustes Verfahren zur Merkmalsextraktion von beliebigen parametrisierbaren geometrischen Formen aus binären Gradientenbildern, welches vor Allem in der digitalen Bildverarbeitung für die Erkennung von Formen wie z.B. Kreisen [56], Kurven [57] oder auch beliebiger [58] Anwendung findet. Das Verfahren wurde 1959 von Paul V. C. Hough zur maschinellen Analyse von Ionisationspfaden beschleunigter Partikel in einer Blasenkammer entwickelt, und 1972 von Richard Duda und Peter Hart in die heutzutage universell angewendete, verallgemeinerte Hough- Transformation überführt.

Als Basis für die Hough-Transformation wird ein zweidimensionales Bild benötigt. Die Merkmalsextraktion für nicht binäre Bilder setzt zunächst eine zweidimensionale Hochpassfilterung zur Hervorhebung der Kanten sowie eine anschließende 1-bit-Quantisierung voraus. Anschließend ist die Abbildung des zu untersuchenden Bildraums auf einen, oft auch als "Hough-Raum" bezeichneten, Parameterraum notwendig, dessen Dimension dabei direkt proportional zur Anzahl der zur Beschreibung der geometrischen Figur notwendigen Parameter ist.

Für die Parametrisierung von Geraden wird im Allgemeinen deren Darstellung in der Hesse-Normalenform gewählt. Durch die Beschreibung der Geraden durch den Abstand d_L ihres Lotfußpunktes L zum Referenzpunkt R , wofür im Allgemeinen der Ursprung verwendet wird, und dem zwischen ihrer Normalengeraden und der Abszisse eingeschlossenen Winkel α ergibt sich ein zweidimensionaler Parameterraum nach der Abbildungseigenschaft:

$$d_L = x \cdot \cos(\alpha) + y \cdot \sin(\alpha), \quad (3.1)$$

wobei x und y jeweils die horizontale bzw. vertikale Bildpunktposition bezeichnen. Abbildung 15 veranschaulicht die Abbildung einer Geraden auf deren Punkt P im Parameterraum.

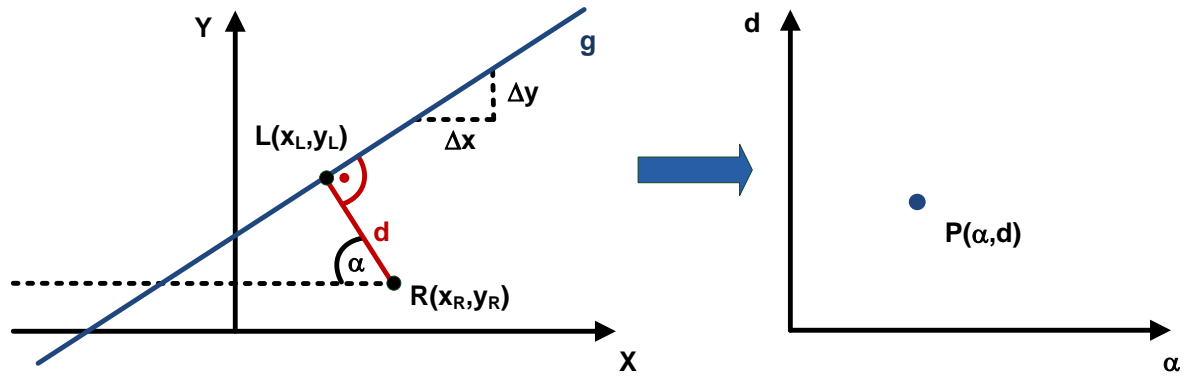


Abbildung 15: Überführung einer Geraden in den Hough Raum

Der Algorithmus, welcher der Hough-Transformation zu Grunde liegt, summiert die Gewichte aller Bildpunkte entlang der zu untersuchenden geometrischen Figur entsprechend der spezifischen Parametergleichung und ermittelt so ein Gewicht im Parameterraum welches als Wahrscheinlichkeitsmaß für die Anwesenheit eben jener geometrischen Figur im Bildraum zu verstehen ist. Für den zuvor eingeführten Beispielfall einer Untersuchung auf Linienstrukturen wird das Gewicht eines Bildpunkts $P(x, y)$ auf alle Punkte $S(\alpha_i, d_{L,j})$ abgebildet, die durch eine Variation von α und d_L entstehen. Das tatsächliche Gewicht für die Wahrscheinlichkeit der Gegenwart einer Linienstruktur ergibt sich aus der Summe aller Gewichte der Bildpunkte entlang dieser Linie zu:

$$S(\alpha, d_L) = \sum_{x_i=1}^n P \left(x_i, \left(\frac{d}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} + x_i \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \right) \right). \quad (3.2)$$

Alle Kantenpixel des, durch die Quantisierung erhaltenen, Binärbilds werden für alle zu überprüfenden Winkel α_i und Abstände $d_{L,j}$ über die Beziehung **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** auf den Parameterraum abgebildet und die zugehörigen Punkte $S(\alpha_i, d_{L,j})$ jeweils um das Gewicht des Pixels erhöht. Das Ergebnis ist eine zweidimensionale Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für das Vorhandensein der zu suchenden geometrischen Figuren. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wird das Ergebnis einer solchen Hough Transformation für ein Binärbild mit Linienstrukturen dargestellt.

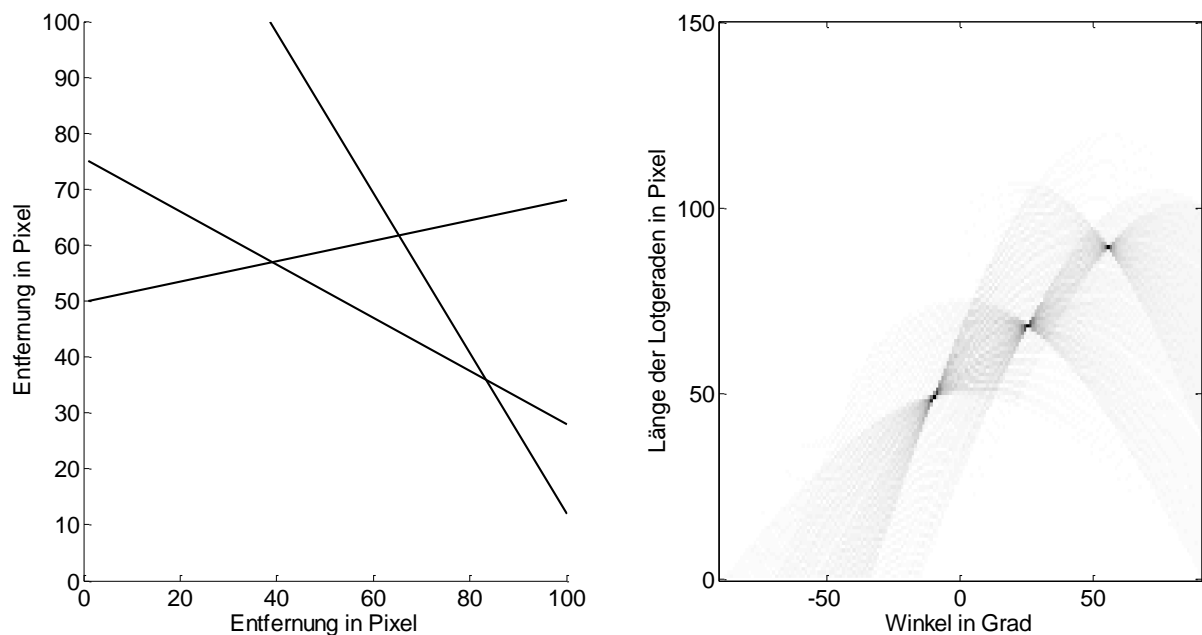


Abbildung 16: Ergebnis der Hough Transformation für ein Binärbild mit Linienstrukturen

Die Analyse des durch die Abbildung des Bildraums geschaffenen gewichteten Parameterraums auf dessen Maxima hin liefert die Parameterkombinationen für die Rekonstruktion der geometrischen Figuren. Die so gewonnenen geometrischen Parameter lassen jedoch keine Aussage über die Ausdehnung der geometrischen Figuren zu, was eine zusätzliche Nachbearbeitung erforderlich macht. Für die Bestimmung der Länge bzw. von Start und Endpunkt einer Linie etwa werden gleitende Schwellwertentscheider eingesetzt, die einen Bildpunkt nur dann einer Linie zuordnen, sofern ein gewisser Schwellwert für die Summe aller Punkte innerhalb eines definierten Bereichs um den zu untersuchenden Punkt entlang der Geraden überschritten wird.

Aufgrund der Brute-Force Natur des Verfahrens geht die Durchführung der Abbildungsoperation mit einem hohen Rechenaufwand und Speicherbedarf einher, was einen Einsatz zur Online-Bildverarbeitung mit vertretbarem Hardwareaufwand zumeist erschwert. Jedoch lässt die vollkommene Unabhängigkeit der einzelnen Zellen des Parameterraums voneinander eine gute Parallelisierung des Verfahrens zu und kommt dem derzeitigen Trend der Hardwareentwicklung entgegen.

Seit dem Bekanntwerden des Hough-Verfahrens wurden viele Untersuchungen durchgeführt, um den Speicherbedarf und Rechenaufwand zu reduzieren wie z.B. in [59], [60] und [61] gezeigt wird.

3.3 Klassifizierung

Die Einordnung eines Musters in zuvor definierte Objekt- bzw. Ereignisklassen stellt den letzten und gleichzeitig wesentlichsten Schritt in der Prozesskette dar. Hierbei werden Verfahren auf den zuvor generierten Parameterraum angewandt, um ...

4 Geometrische und mechanische Randbedingungen

Der Entwicklung, des in dieser Arbeit vorgestellten, Verfahrens zur Umgebungsabbildung wurde die aktuell am Markt angebotene Bandbreite an ultraschallbasierten Assistenzsystemen für Flurförderfahrzeuge zugrunde gelegt. So werden aktuell vor allem Zwei- bis Vier-Kanal-Systeme angeboten, um das Umfeld bei der Rückwärtsfahrt zu überwachen. Für autonome Flurförderzeuge sind solche Systeme aufgrund der gesteigerten Anforderungen an die Abbildungsgüte des Systems jedoch nicht ausreichend. Aus diesem Grund wird für die weiteren Betrachtungen ein Sechs-Kanal-System verwendet. Weiterhin macht eine effektive Umsetzung einer verbesserten Umgebungsabbildung eine genaue geometrische Analyse der Umgebungssituation notwendig.

4.1.1 Wandleranordnung

Die Anordnung der Wandler wird direkt durch den abzubildenden Umgebungsbereich vorgegeben. In Anlehnung an Ultraschallabstandswarnsysteme aktueller Flurförderfahrzeuge, welche je nach Typ aus zwei bis vier Wandlern bestehen und symmetrisch zur Mittelachse des Fahrzeugs angeordnet sind wurde zur Überwachung des Bereichs unmittelbar hinter dem Flurförderfahrzeug eine Anordnung mit vier äquidistant angeordneten Wandlern gewählt. Die Wandler innerhalb der Anordnung besitzen dabei alle eine uniforme Orientierung parallel zur Fahrzeugachse und keinen Versatz in y-Richtung zueinander. Die Überwachung bzw. Abbildung des Bereichs unmittelbar neben dem Fahrzeug bedingt jeweils einen um 90° zur Bewegungsrichtung des Fahrzeugs gedrehten Wandler in dessen Flanken, weshalb nachfolgend von einer entsprechenden Anordnung ausgegangen wird.

Die beschriebenen geometrischen Randbedingungen müssen aufgrund ihres Einflusses auf Signallaufzeiten und Richtwirkung der Wandleranordnung für das Verfahren berücksichtigt werden. Abbildung 17 zeigt die beschriebenen Positionen der Wandler am Flurförderzeug und den sich daraus ergebenden beleuchteten Bereich.

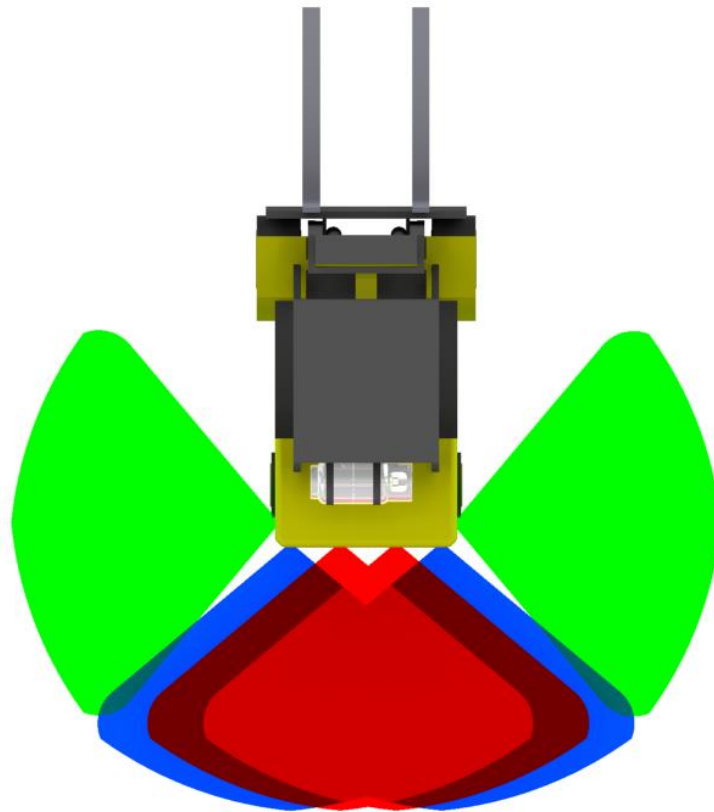


Abbildung 17: Wandleranordnung am Flurförderfahrzeug

4.1.2 Modellierung der Fahrzeugbewegung

Zur Modellierung der Fahrzeugbewegung der Flurförderfahrzeuge wurde das lineare Einspurmodell herangezogen, welches die theoretische Grundlage für die Beschreibung der stationären und instationären querdynamischen Vorgänge bei der Kurvenfahrt von ein- und zweispurigen Fahrzeugen bildet [62]. Aufgrund der sehr niedrigen vorherrschenden Geschwindigkeiten während der Gutaufnahme kann von ebenfalls sehr niedrigen Querbeschleunigungen ausgegangen werden. Für niedrige Querbeschleunigungen wiederum kann ein lineares Verhalten des Fahrzeugs vorausgesetzt werden welches näherungsweise durch die Modellvorstellung abgebildet wird.

Im vorliegenden Beispiel soll von einem zweispurigen Fahrzeug mit Achsschenkelenkung auf der Vorderachse während der Rückwärtsfahrt ausgegangen werden. Als Eingangsgrößen werden der Lenkwinkel ε und die vom rechten Hinterrad zurückgelegte Strecke b erfasst. Die Bewegung eines solchen Fahrzeugs kann wie nachfolgend gezeigt durch das Einspurmodell

beschrieben werden. Der Abstand R des Momentenpols M zum Mittelpunkt der Starrachse Q ergibt sich aus dem Radstand D und dem Lenkwinkel δ zu:

$$R = D \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right). \quad (4.1)$$

Die Absolutposition des Momentenpols folgt dann aus der Absolutposition des Mittelpunkts der Starrachse und dem Winkel φ zwischen Starrachse und der x-Achse des Absolutkoordinatensystems zu:

$$\begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_Q - R \cdot \cos(\varphi) \\ y_Q - R \cdot \sin(\varphi) \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

Anschließend errechnet sich der Rotationswinkel ϑ des Fahrzeugs mit Kenntnis des vom rechten Hinterrad zurückgelegten Wegs b und dem halben Radabstand s zu:

$$\vartheta = \frac{b}{R \pm s}, \quad (4.3)$$

Die Erfassung des zurückgelegten Wegs über ein einziges Rad macht eine Fallunterscheidung in Abhängigkeit vom Lenkwinkel des Fahrzeugs notwendig:

$$\vartheta = \begin{cases} \frac{b}{R + s} & \text{für } \delta \geq 0 \\ \frac{b}{R - s} & \text{für } \delta < 0 \end{cases}, \quad (4.4)$$

Die Rotation des Mittelpunkts des Wandlerarrays P_W um den Winkel ε im Abstand $R+s$ um den Momentenpol ergibt sich aus der Multiplikation des Abstandsvektors zwischen M und P_W mit der Rotationsmatrix zu:

$$\begin{pmatrix} x_{P'_W} \\ y_{P'_W} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{P_W} - x_M \\ y_{P_W} - y_M \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_U \\ y_U \end{pmatrix}, \quad (4.5)$$

Abbildung 18 zeigt die geometrischen Annahmen des Einspurmodells für eine Kurvenfahrt des Fahrzeugs.

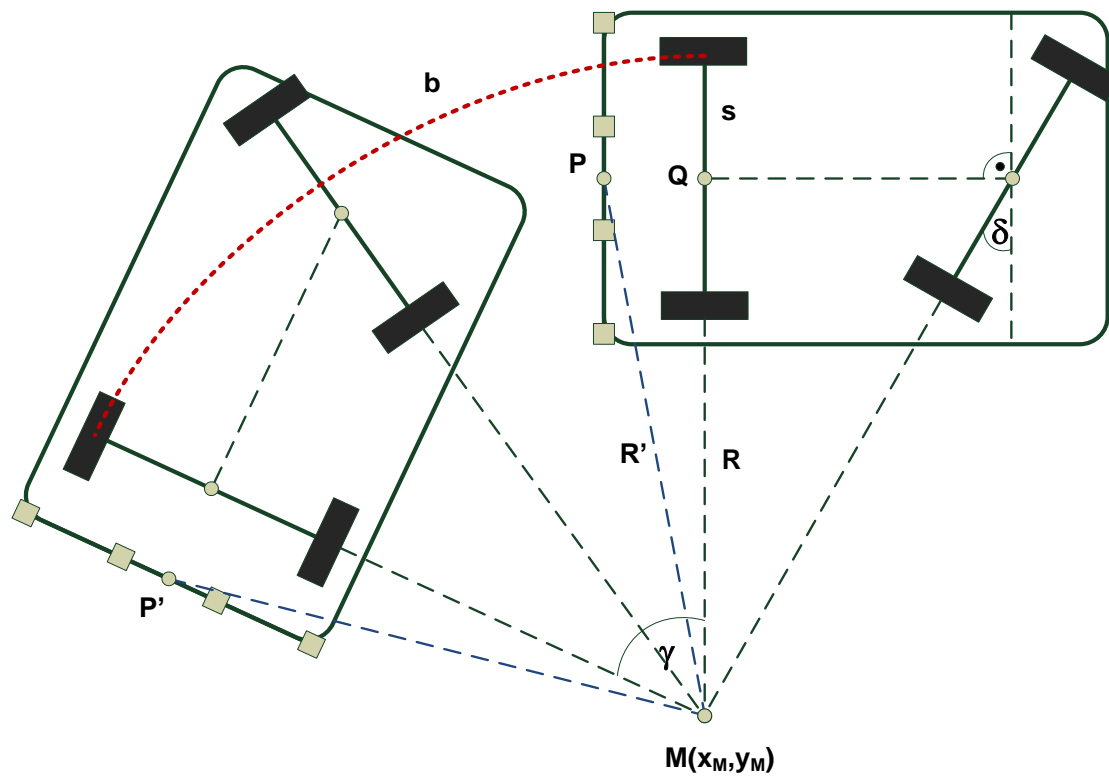


Abbildung 18: Kurvenfahrt eines zweispurigen Fahrzeugs

5 Herausforderungen aktuell eingesetzter Systeme

Beim Betrieb autonomer Flurförderzeuge treten häufig räumlich stark begrenzte Umfeldszenarien auf. Die Abbildung dieser Objektszenen ist aus sicherheitstechnischer Sicht als besonders kritisch zu bewerten, da sich die Kollisionsgefahr in solchen Situationen am höchsten darstellt [63]. Die heutzutage bereits in Flurförderzeugen etablierten Systeme leisten gute Detektionsarbeit, sind aber vom Grundkonzept zumeist für eine einfache Objektdetektion und nicht für die Abbildung der Objektszene ausgelegt. Für autonome Fahrzeuge ist ein gesteigertes Umfeldbewusstsein des Systems jedoch zwingend notwendig.

Exemplarisch wurden zwei gestellte, an Alltagssituationen beim Betrieb von Flurförderzeugen angelehnte Szenarien untersucht. Zum einen das Einfahren in eine Bucht quer zur Fahrtrichtung, wie es in [64] beschrieben wird, welches bei der Aufnahme und Ablage versetzter Güter-Paletten häufig durchgeführt werden muss. Die Maximierung des Verhältnisses von gelagertem Gut zu in Anspruch genommener Fläche führt dabei zu beidseitig begrenzten Fahrwegen deren Ausdehnung die Fahrzeugbreite zumeist maximal um einen halben Meter in beide Richtungen übersteigt. Abbildung 19 zeigt ein Flurförderfahrzeug in der beschriebenen Situation bei der Einfahrt in eine Bucht aus Lagergutpaletten.

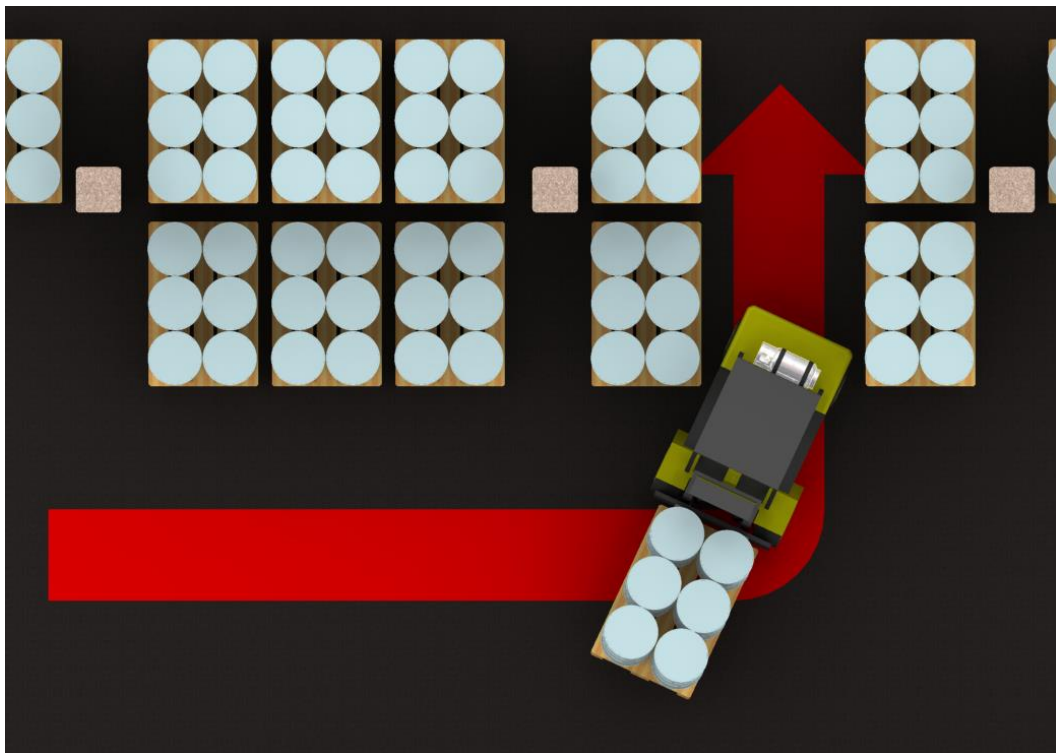


Abbildung 19: Einfahren in Bucht quer zur Fahrtrichtung

Der zweite Anwendungsfall ist in Abbildung 20 dargestellt, und beschreibt die Annäherung des Flurförderfahrzeugs an zwei punktförmige Hindernisse vor winklig angeordneten, stark störenden Hintergrundreflektoren. Die Punktstreuer werden im vorliegenden Fall durch zwei Poller, wie sie auch für die Abgrenzung von Personenbereichen genutzt werden, repräsentiert. Die Hauptaufgabe des Sensorsystems ist in beiden Fällen die zuverlässige Kollisionsvermeidung von Flurförderfahrzeug und umgebenden Objekten.

Bei der Einfahrt in die enge Lagerbucht ist dabei vor allem die Abbildung der Kontur der innenliegenden Buchtflanke bzw. der hervorstehenden Ecke der Bucht für den Flankenschutz des Fahrzeugs von Bedeutung.

Eine zuverlässige Kollisionswarnung im Mehrziel-Szenario bedingt eine genaue Bestimmung der Position aller Hindernisse. Die Minimierung von Fehlwarnungen besitzt in diesem Fall die selbe Relevanz wie die sichere Detektion der Objekte, da gehäufte Fehlwarnungen bei fahrerlosen Systemen zu unnötigen Unterbrechungen des Arbeitsflusses und bei von Fahrern geführten Systemen wie bereits eingangs erwähnt nach kurzer Zeit zum Ignorieren der Warnsignale führen.

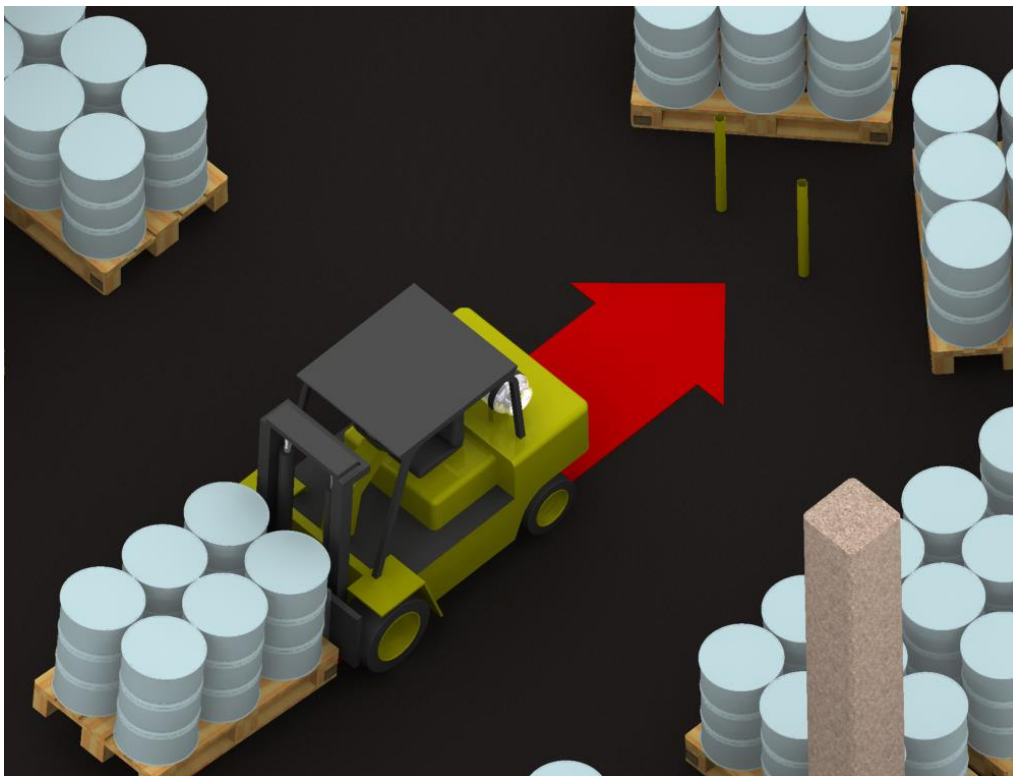


Abbildung 20: Annäherung an zwei Punktziele vor Störreflektor

Die Abbildung der beschriebenen Situationen mit den in Abschnitt 2.2.4 dargestellten Ortungsverfahren stößt in Abhängigkeit von der Komplexität der Objektszene an ihre Grenzen hinsichtlich der Eindeutigkeit. Wie bereits beschrieben ist die Bestimmung eines eindeutigen Ortungsergebnisses auf analytischem Weg durch die Anzahl möglicher Kombinationen aus allen empfangenen Übertragungswegen problematisch.

Obwohl die laufzeitrichtige, additive Rekonstruktion der Objektszene eine hohe Robustheit bietet, können unter bestimmten Randbedingungen auch hierbei stark mehrdeutige Ergebnisse auftreten. Speziell die präzise Abbildung von verteilten Punktstreuern vor ausgedehnten reflektierenden Flächen kann aufgrund der räumlichen Verteilung der empfangenen Laufzeiten zu nicht eindeutigen Ergebnissen führen, wie in Abbildung 21 gezeigt wird.

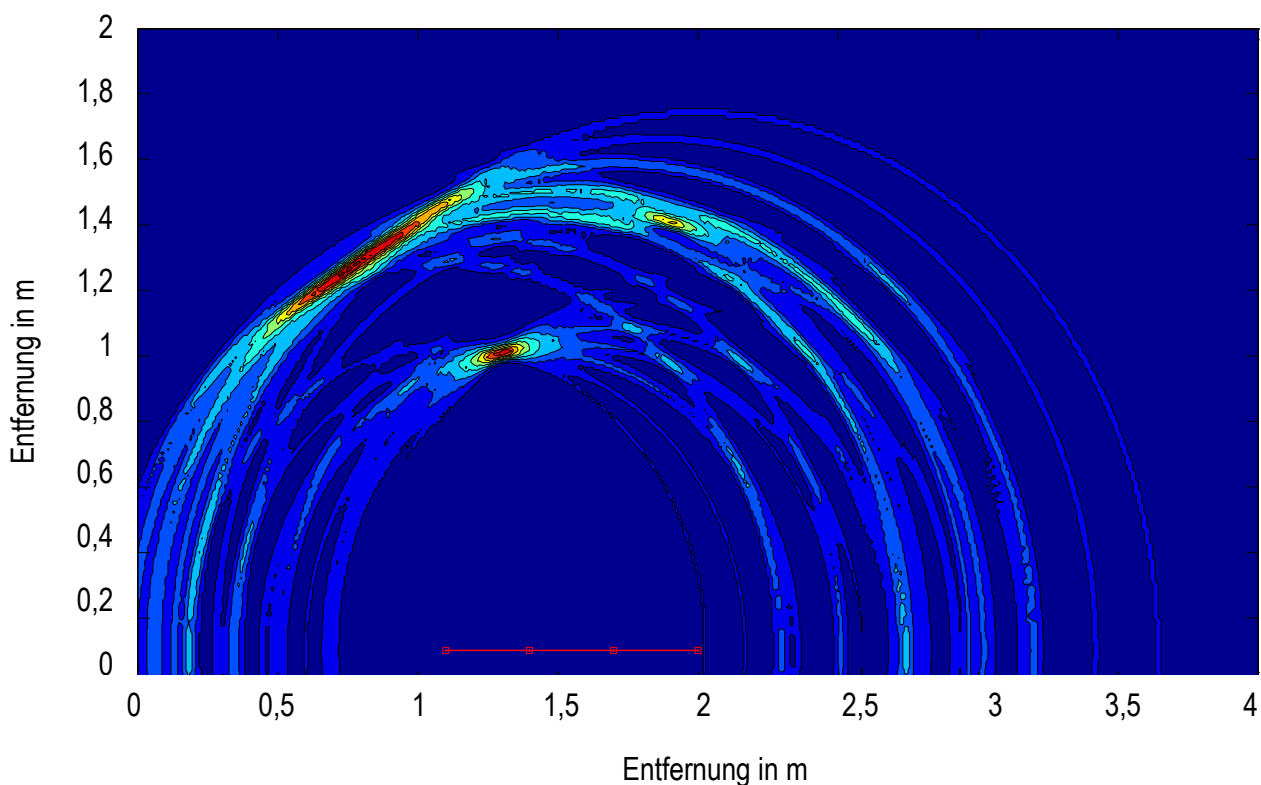


Abbildung 21: Simulationsergebnis bei Gegenwart einer Wand

Wie bereits zuvor erwähnt, ist ein gesteigertes Umfeldbewusstsein eine Voraussetzung für eine sichere autonome Fahrzeugführung. Zur Steigerung der Eindeutigkeit des Ortungsergebnisses bzw. der Abbildung der Objektszene und somit der Umfeldwahrnehmung des Systems können grundsätzlich zwei Ansätze verfolgt werden. Zum einen kann die Leistungsfähigkeit und/oder Redundanz bzw. Anzahl der verfügbaren Sensoren erhöht werden, zum anderen kann die eingesetzte Algorithmik zur Auswertung der bestehenden Sensorinformation hinsichtlich einer gesteigerten Umfeldwahrnehmung erweitert werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, das, basierend auf den heutzutage vorherrschenden Sensorsystemen im Bereich der Flurförderfahrzeuge, die Auswertung der Signalinformation um eine Rechenzeiteffiziente parametrierbare Klassifizierung erweitert. Die einzelnen Komponenten der entwickelten Algorithmik sollen nachfolgend erläutert werden.

6 Entwickler Algorithmus zur Umfeldklassifizierung

Um die Eindeutigkeit der Umgebungsabbildung durch monostatische wellenbasierte Mehrwandlersysteme zu steigern wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, das eine rechenzeiteffiziente Klassifizierung der von den Sensoren beleuchteten Objekte in Anlehnung an die Hough-Transformation ermöglicht. Die Klassifizierung erfolgt hierbei allein anhand der empfangenen Reflexionsmuster direkt in den Sensorsignalen.

Der entwickelte Algorithmus ist sowohl auf reale, als auch synthetische Wandleranordnungen anwendbar, und bietet somit auch die Möglichkeit der Objektklassifizierung mit bewegten Einzelwandlern, wie sie z.B. in den Fahrzeugflanken auftreten. In der Konsequenz können auch Umfeldkartenansätze im vollen Maße von dem hier vorgestellten Ansatz profitieren.

Der Einsatz von a priori berechneten Zuordnungstabellen bietet zudem die Möglichkeit bereits klassifizierte Signalanteile aus den Signalen zu entfernen und dadurch eine Klassifizierung bzw. Verortung der verbliebenen Echoinformationen zu verbessern.

6.1 Mustererkennung

In der vorliegenden Arbeit wurde das in Abschnitt 3 beschriebene Verfahren der Mustererkennung zur Verbesserung der Abbildung von Objektszenen eingesetzt. Auf Basis der physikalischen Signalausbreitung wurden charakteristische Reflexionsmuster für die zu klassifizierenden Objektklassen berechnet. Die auf diese Weise generierten Mustervorlagen werden mit den tatsächlich empfangenen Echoprofilen verglichen und liefern so eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für bestimmte Objektklassen im Parameterraum.

6.2 Vorverarbeitung

Im vorliegenden Fall besteht die Vorverarbeitung der aufgenommenen Information vor allem in der Filterung der Analogsignale. Das entwickelte System nutzt die durch Ultraschallwandler empfangenen Analogsignale als Eingangsinformation. Die saubere Trennung der Objektechos vom Umgebungsrauschen stellt dabei den ersten Schritt der Signalverarbeitung dar. Zur Maximierung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses werden

unerwünschte Signalanteile des empfangenen Analogsignals durch ein Bandpassfilter unterdrückt.

Da aktuell industriell eingesetzte Systeme zur Nahbereichsüberwachung keine Auswertung der Phaseninformation ermöglichen werden die aufgenommenen analogen Echoprofile durch Hüllkurvendemodulation auf deren Betragsinformation reduziert. Die so gewonnenen Echoprofile der nicht-redundanten Übertragungswege bilden die Eingangsgröße für die Merkmalsextraktion.

6.3 Merkmalsextraktion

Die Hauptaufgabe der Merkmalsextraktion stellt die Aufbereitung der Eingangsdaten in einem Parameterraum dar um eine Klassifizierung der erfassten Informationen zu ermöglichen. Die Dimension des Parameterraums entspricht dabei der Anzahl der zur Klassifizierung benötigten Merkmale und sollte mit Hinblick auf die Systemperformance so niedrig wie möglich gewählt werden. In der vorliegenden Arbeit wurden die Objektklassen Linien- und Punkt-reflektor unterschieden. Hierzu wurde ein zweidimensionaler Parameterraum auf Basis der Hough Transformation zur Beschreibung der Linien-Objekte gewählt. Allgemein sind jedoch durch eine Anpassung des Parameterraums beliebige Objektgeometrien klassifizierbar.

6.3.1 Räumliches Optimalfilter für beliebige Objektgeometrien

Die Filterung eines Satzes empfangener Echoprofile findet ähnlich wie bei der Hough-Transformation in einem, durch die charakteristischen Parameter der zu filternden Objekte definierten, Merkmalsraum statt. Im Gegensatz zum Verfahren nach Hough wird die Filterung jedoch direkt in den empfangenen Echoprofilen durchgeführt. Die Generierung eines Bildes ist also für eine Filterung nicht erforderlich. Für die Filterung werden hypothetische Reflexionsmuster der zu klassifizierenden Objekte berechnet und mit den von der Wandleranordnung empfangenen Signalen korreliert.

6.3.2 Geometrische Herleitung des Reflexionsmusters

Mit Kenntnis der physikalischen Signalausbreitung lassen sich die zu erwartenden Reflexionsmuster für verschiedene Objektklassen im Voraus berechnen und als Zuordnungstabelle ablegen. Bei der Berechnung des Huygens'schen Beugungsintegrals, welches beschrieben wird in [65], [66] und [67], für ausgedehnte Flächenreflektoren zeigt sich, dass einfallende Wellenfronten dem Reflexionsgesetz gehorchen und ihrem Einfallswinkel entsprechend gerichtet reflektiert werden. Die einfallende Welle regt beim Auftreffen die Oberfläche des Objekts an, welche daraufhin ebenfalls eine Wellenfront aussendet. Der zeitliche Versatz entlang der reflektierenden Fläche aufgrund des Einfallswinkels bedingt eine Überlagerung der angeregten Wellen im entsprechenden Ausfallswinkel. Einfallswinkel und Ausfallswinkel sind dabei betragsmäßig identisch. Abbildung 22 zeigt das Prinzip der Reflexion einer ebenen Welle nach dem Prinzip der Elementarstrahler.

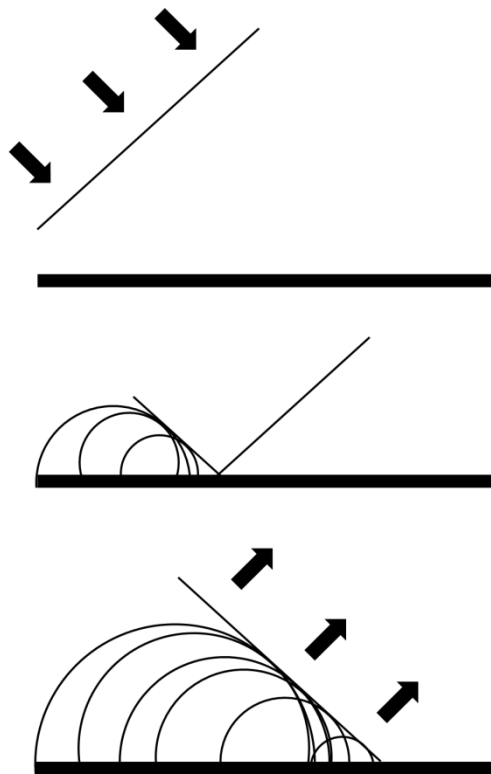


Abbildung 22: Reflexion einer ebenen Welle nach dem Huygens'schen Prinzip

Die Berechnung eines Reflexionsmusters sei nachfolgend exemplarisch für eine "Wand" und die in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Wandleranordnung durchgeführt.

Ausgehend von einer ausgedehnten Wand die unter einem Winkel β zum Wandlerarray angeordnet ist, ergeben sich aus den 16 theoretisch möglichen Übertragungswegen maximal zehn charakteristische, nicht redundante Reflexionspunkte bzw. Signallaufzeiten. In Abbildung 23 sind die 16 Übertragungswege sowie die sich daraus ergebenden 10 nicht redundanten Reflexionspunkte gezeigt die sich für die beschriebene Anordnung für eine Wand unter dem Winkel β ergeben.

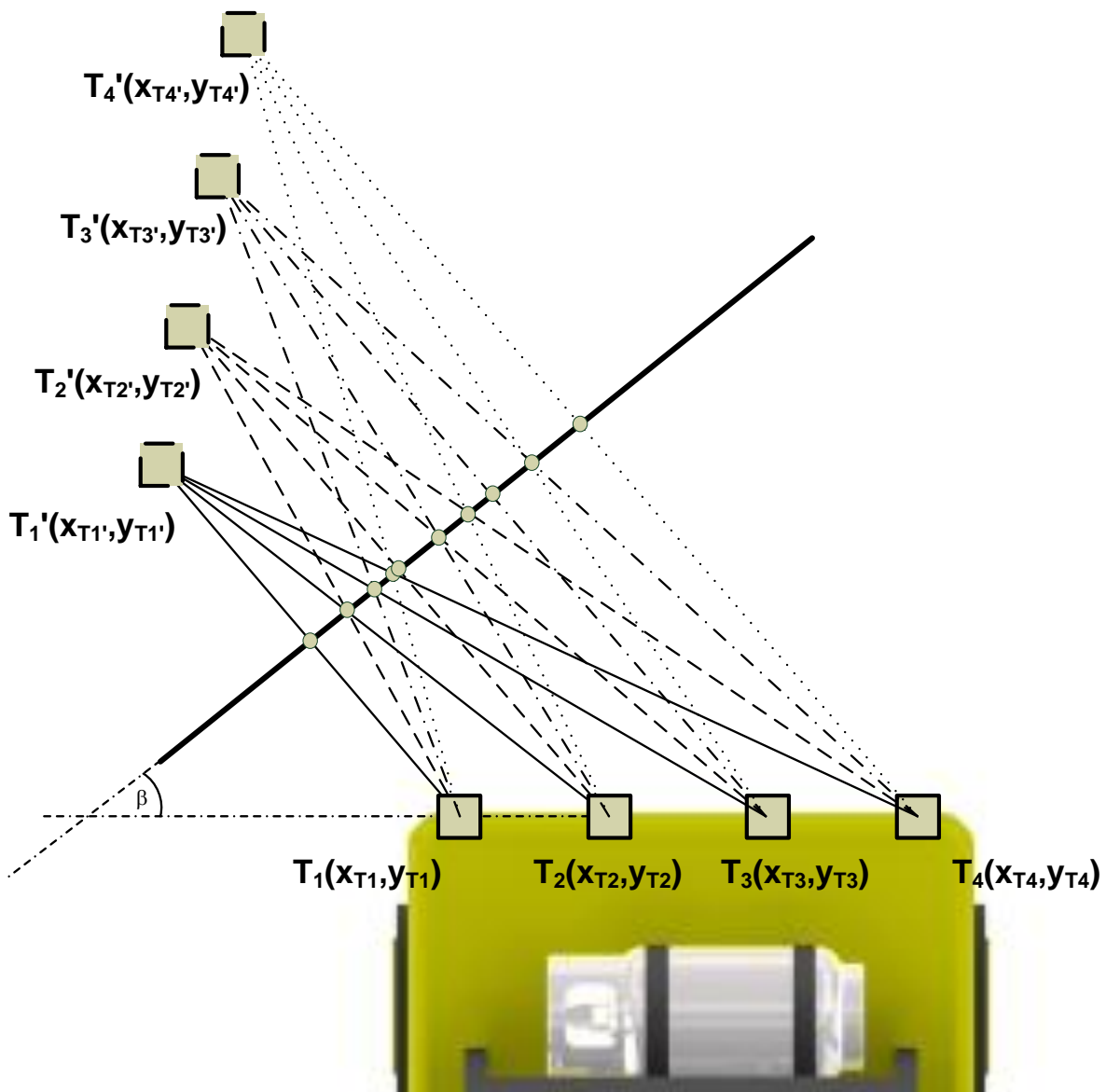


Abbildung 23: Charakteristische Reflexionspunkte einer Wand

Die Bestimmung der charakteristischen Laufzeiten setzt die Berechnung der Koordinaten der Reflexionspunkte voraus. Ausgehend von einem zweidimensionalen Bildraum mit einem kartesischen Koordinatensystem dessen Ursprung sich horizontal in der Mitte der Wandleranordnung und vertikal auf Höhe der Wandler T_2 und T_3 befindet besitzt eine Gerade die Form:

$$g = \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} + \psi \cdot \begin{pmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

Dieselbe Gerade kann in Anlehnung an die Darstellung in der Hesse-Normalenform auch durch die Distanz d_L ihres Lotfußpunktes $P_L(x_L, y_L)$ zu einem Referenzpunkt $P_{Ref}(x_R, y_R)$ sowie dem Winkel α zwischen ihrer Lotgeraden und der x-Achse des Koordinatensystems beschrieben werden:

$$g: \begin{pmatrix} x - x_R \\ y - y_R \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}} \cdot \begin{pmatrix} \Delta_y \\ \Delta_x \cdot \tan(\alpha) \end{pmatrix} - d_L = 0. \quad (6.2)$$

Die Koordinaten des Lotfußpunkts des Referenzpunkts auf der Geraden ergeben sich aus (6.1) zu:

$$P_L = \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} + \left(\frac{(x_R - x_g) + (y_R - y_g) \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}{\Delta_x \cdot \left(1 + \left(\tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\right)^2\right)} \right) \cdot \begin{pmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{pmatrix}. \quad (6.3)$$

Die Reflexionspunkte der direkt von der Wand zu den Wandlern zurückgeworfenen Echos entsprechen nach dem Reflexionsgesetz den Lotfußpunkten der Wandler auf der Geraden. Unter Verwendung der Distanz zwischen Referenz- und Lotfußpunkt als Bezugsgröße ergeben sich die Lotfußpunkte der vier Wandler zu:

$$\begin{pmatrix} x_{L,T_i} \\ y_{L,T_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{T_i} - \cos(\alpha) \cdot \left[d_L - \left(\cos(\alpha) \cdot (x_R - x_{T_i}) + \sin(\alpha) \cdot (y_R - y_{T_i}) \right) \right] \\ y_{T_i} - \sin(\alpha) \cdot \left[d_L - \left(\cos(\alpha) \cdot (x_R - x_{T_i}) + \sin(\alpha) \cdot (y_R - y_{T_i}) \right) \right] \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

Mit Kenntnis der Lotfußpunkte lassen sich durch Spiegelung an der Wand die projizierten Sendepositionen aller Wandler des Arrays bestimmen:

$$\begin{pmatrix} x_{T'_i} \\ y_{T'_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{L,T_i} + (x_{T_i} - x_{L,T_i}) \\ y_{L,T_i} + (y_{T_i} - y_{L,T_i}) \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

Die Verwendung der projizierten Wandlerpositionen erlaubt eine einfache Bestimmung von Laufzeit und Reflexionspunkt auf der Wand für alle Übertragungswege. Die Reflexionspunkte entlang der Wand ergeben sich aus den Schnittpunkten der Übertragungswege mit der Wand aus (6.1) nach:

$$\begin{pmatrix} x_{refl,ij} \\ y_{refl,ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} + \frac{(y_{T'_i} - y_g)(x_{T'_i} - x_{T_j}) + (x_g - x_{T'_i})(y_{T'_i} - y_{T_j})}{(x_{T'_i} - x_{T_j}) \cdot \Delta_y + (y_{T'_i} - y_{T_j}) \cdot \Delta_x} \begin{pmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

Die Laufzeiten ergeben sich aus den Distanzen der tatsächlichen Wandler zu den projizierten Wandlern nach:

$$\tau_{i,j} = \frac{\sqrt{(x_{T'_i} - x_{T_j})^2 + (y_{T'_i} - y_{T_j})^2}}{c} \quad (6.7)$$

6.3.3 Zuordnung von Echoanteilen zu Objektmerkmalen

Die wie in 6.3.2 beschrieben für jede gewünschte Kombination aus α und d_L generierten Reflexionsmuster werden in einer Zuordnungstabelle abgelegt um eine Berechnung während der Messung zu vermeiden. Abbildung 24 zeigt die berechneten Zuordnungstabellen für die Übertragungswege von Sensor T_1 .

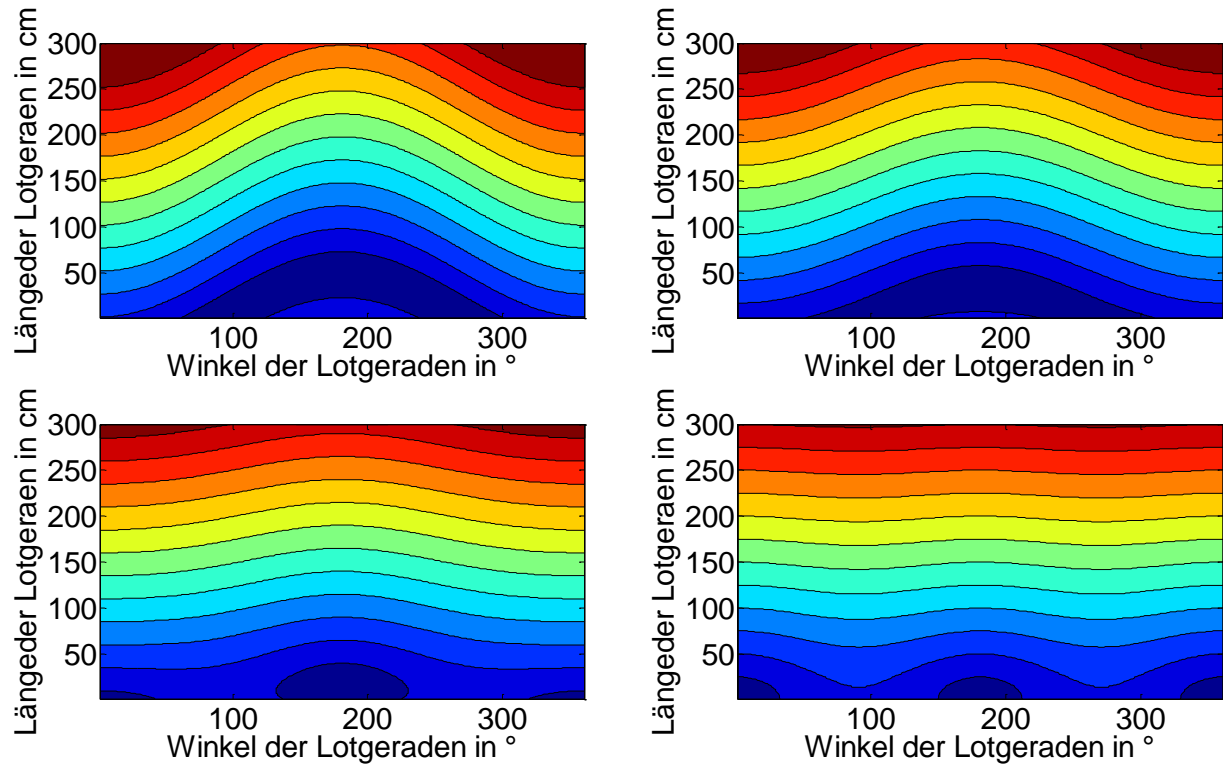


Abbildung 24: Zuordnungstabellen für Sensor T₁

Nach erfolgter Messung aller im Array vorhandenen Wandler können die aufgenommenen Signale mit Hilfe der berechneten Reflexionsmuster auf bestimmte Objektklassen hin untersucht werden. Abbildung 25 zeigt die von einer Wand reflektierten und vom Wandlerarray aufgenommenen Signale der charakteristischen Signalpfade für einen vollen Messzyklus.

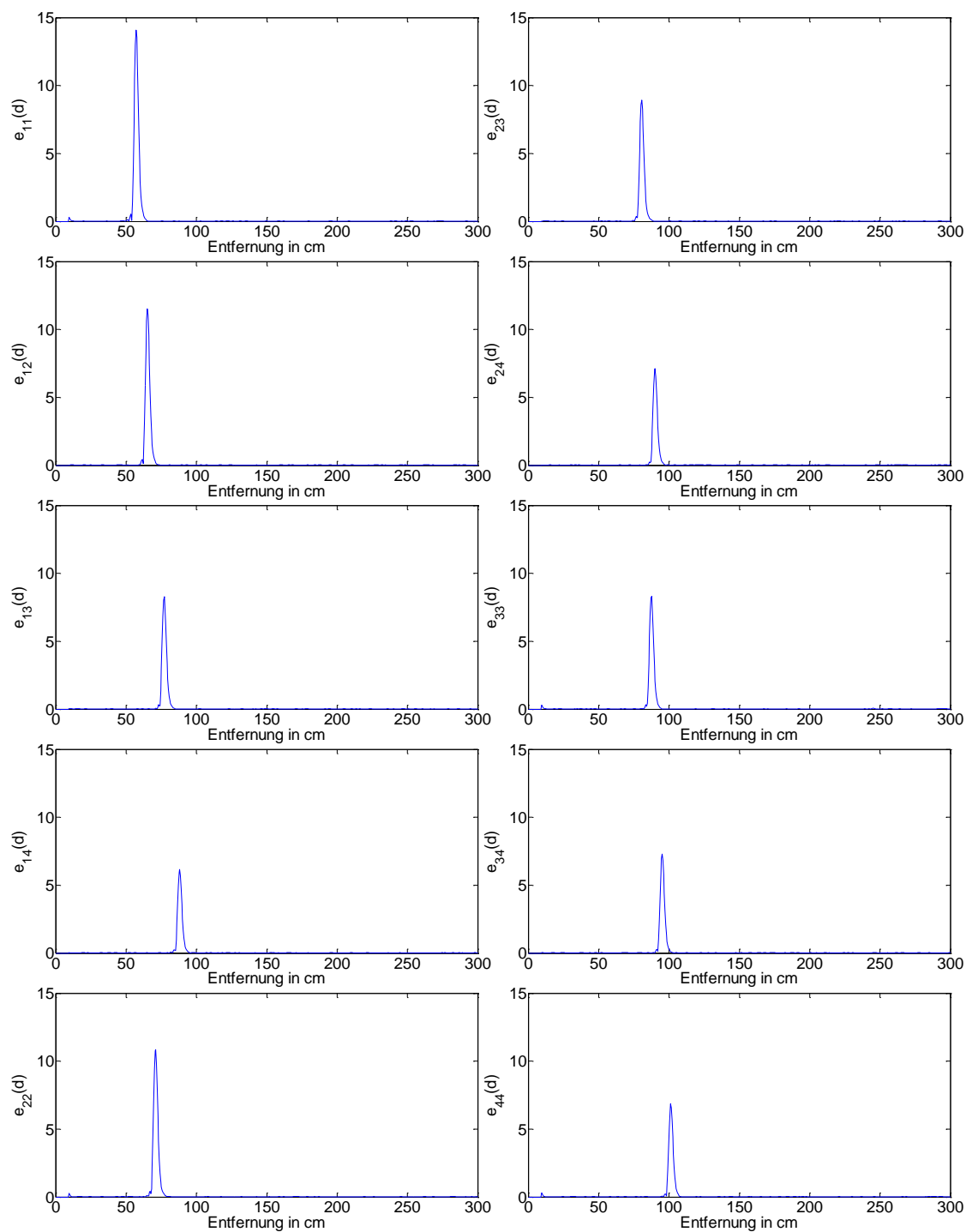


Abbildung 25: Simulierte Echoprofile einer Wand unter einem Winkel von 30° und einem Abstand von 80 cm zur Wandleranordnung

Für alle Punkte $P(\alpha, d_L)$ des Parameterraums werden die Signalamplituden der empfangenen Echoprofile zu den 10 charakteristischen Laufzeiten $\tau_{i,j}(\alpha, d_L)$ summiert und ergeben so ein Gewicht G für die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit einer Wand unter den charakteristischen Parametern α und d nach:

$$G(\alpha, d_L) = \sum_{i=1}^{10} e_i(\tau_i(\alpha, d_L)) \quad (6.8)$$

wobei e_i die Echoprofile der nicht redundanten Übertragungspfade und τ_i die a priori berechneten Laufzeiten für die charakteristischen Reflexionen bezeichnen. Abbildung 26 zeigt den so generierten Parameterraum für die in Abbildung 25 gezeigten Signale, sowie die Parameterräume für Wände mit identischem Fußpunkt und den Winkeln 0° , 15° und 45° .

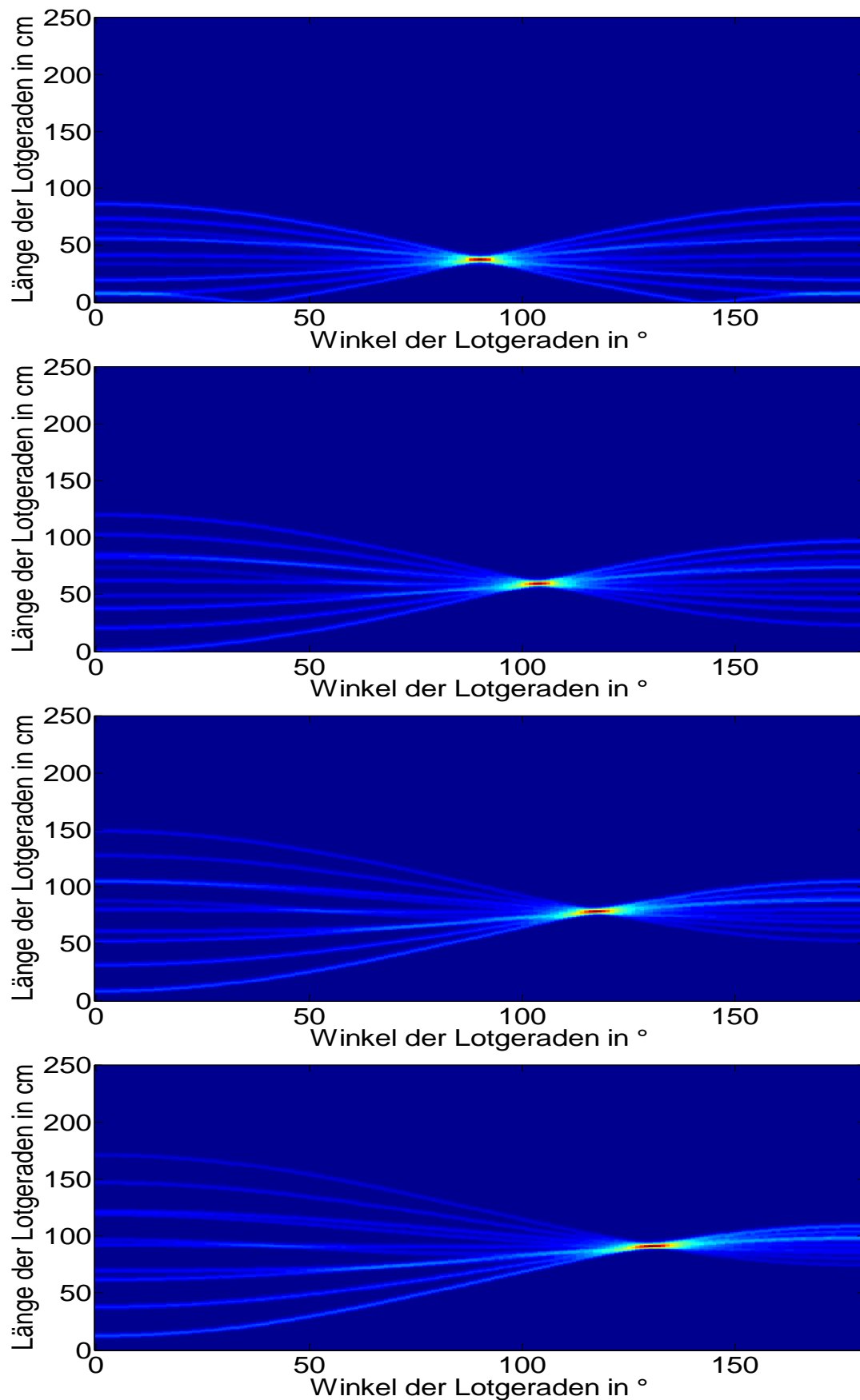


Abbildung 26: Simuliertes Filterergebnis einer Wand mit identischem Fußpunkt unter den Winkeln 0° (oben), 15°, 30° und 45° (unten)

Das deutlich zu erkennende Maximum entspricht dabei dem detektierten Linienreflektor (Wand)

6.4 Klassifizierung

Die Einordnung eines Musters in zuvor definierte Objekt- bzw. Ereignisklassen findet im vorliegenden Fall über eine Maximasuche im entsprechenden Parameterraum statt. Die erfasste Signalinformation wurde wie bereits erwähnt auf zwei Objektklassen hin untersucht zum einen Linienreflektoren und zum anderen Punktstreuer. Der Parameterraum für Linienreflektoren ergibt sich aus dem in Kapitel 6.3.1 hergeleiteten Filter, der Parameterraum für Punktstreuer entspricht der laufzeitrichtigen Addition aus Abschnitt 2.2.4. Beide Parameterräume besitzen dabei zwei Dimensionen, im ersten Fall Winkel und Länge der Lotgeraden und im zweiten Fall die Position in x- und y-Richtung. In

Abbildung 27 sind beide Parameterräume für dieselbe Objektszene dargestellt.

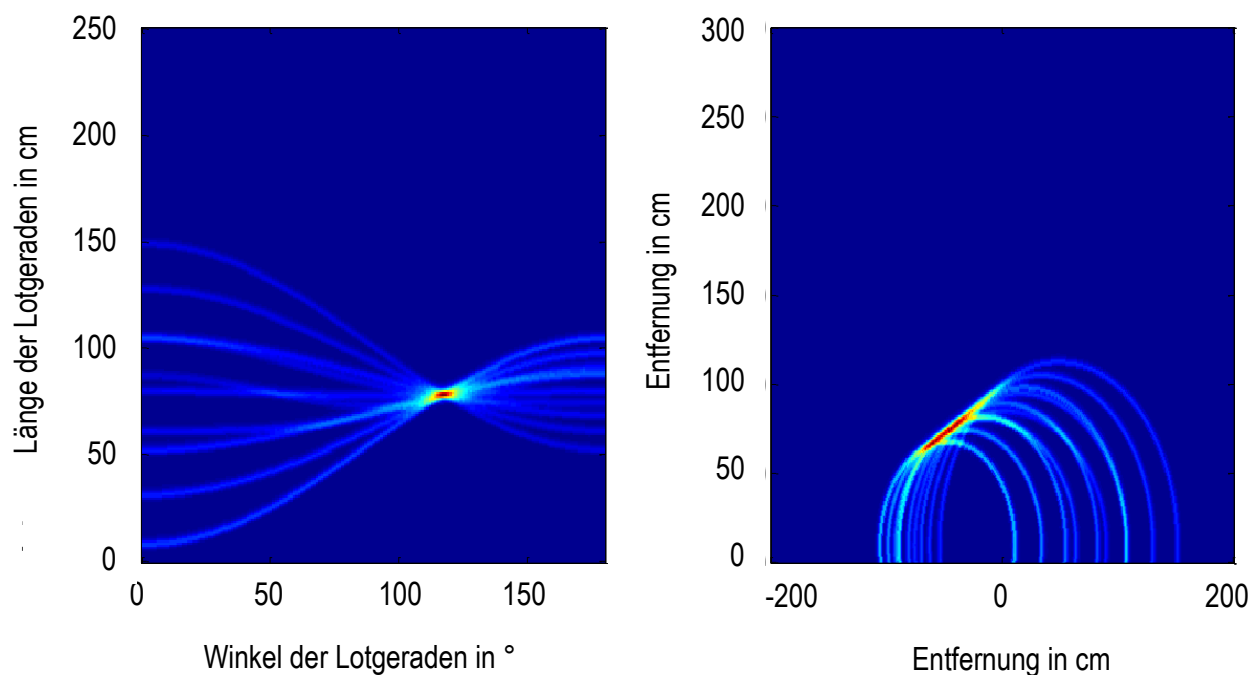


Abbildung 27: Simulierte Parameterräume für die Objektklassen Linie (links) und Punktstreuer (rechts)

6.5 Rekonstruktion der Objektszene

Aufgrund der Annahme eines Punktziels beschränkt sich die Rekonstruktion der Punktstreuer auf deren Verortung im Umfeld des Flurförderzeugs. Bei Linienreflektoren ist zusätzlich zu deren Abstand und Winkel zur Wandleranordnung deren Ausdehnung von Bedeutung. Die Überprüfung der Sichtbarkeit bzw. auf Verdeckung der Objekte erhöht die Eindeutigkeit der Abbildung zusätzlich.

Weiterhin ist die sequentielle Untersuchung der Signalinformation auf die Objektklassen hin von Vorteil, sofern man bereits klassifizierte Objekte anschließend aus dem Signal entfernt. Nachfolgend soll auf die zur Rekonstruktion notwendigen Schritte eingegangen werden.

6.5.1 Abschätzung der Ausdehnung der Objekte

Die Bestimmung der tatsächlichen Breite, sowie etwaiger Lücken innerhalb einer detektierten Wand stellen eine Grundvoraussetzung für die detaillierte Abbildung der Umgebung des Fahrzeugs dar. Unter Verwendung der in 6.3.2 berechneten Beziehungen können Aussagen über die Ausdehnung der erkannten Objekte im Sichtbereich der Wandleranordnung getroffen werden. Im Gegensatz zur Längenbestimmung von Linien bei der Hough-Transformation müssen nicht alle Bildpunkte entlang der Geraden untersucht werden. Für ein detektiertes Objekt müssen lediglich die bereits ermittelten Signalamplituden der aufgenommenen Echoprofile zu den zehn charakteristischen Laufzeiten mit einem zuvor definierten Schwellwert verglichen werden. Die Verknüpfung der charakteristischen Laufzeit mit einer Position im fahrzeugbezogenen bzw. absoluten Bildraum über die Zuordnungstabellen lässt eine Abbildung des detektierten Objekts ohne zusätzlichen Rechenaufwand zu. Die Überprüfung aller Punkte entlang der Wand lässt zudem die Detektion von Lücken innerhalb des von den Sensoren erfassten Bereichs zu. In Abbildung 28 ist die Rekonstruktion eines Wandreflektors dargestellt.

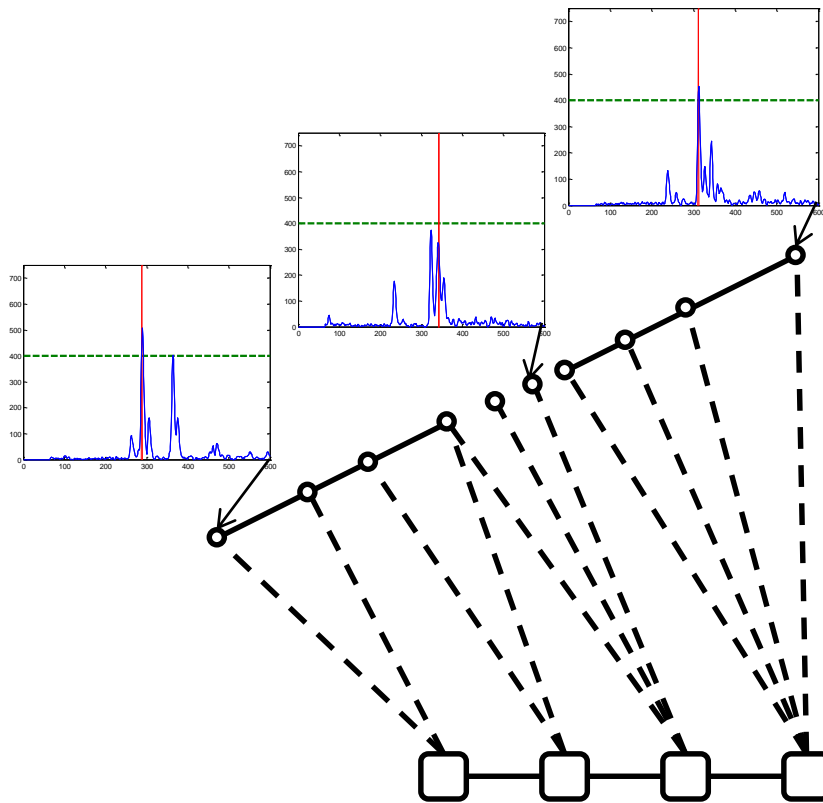


Abbildung 28: Ausdehnungsabschätzung

6.5.2 Bestimmung der Sichtbarkeit detektierter Objekte

Situationen mit starken Reflektoren, wie etwa Wänden, unmittelbar vor der Wandleranordnung können zu Phantomzielen durch mehrfach zwischen Objekt und Sensor hin- und herlaufenden Signalen führen. Eine eindeutige Darstellung des beleuchteten Szenarios erfordert die Erkennung bzw. Unterdrückung solcher Phantomziele.

Die Filterung der vom Wandlerarray detektierten Objekte wurde mit Hilfe einer Plausibilitätsüberprüfung implementiert. In einem Zwischenschritt wird anschließend an die Verarbeitung der Signale durch das räumliche Filter und die laufzeitrichtige Addition der Punktziele eine Sichtbarkeitsprüfung der identifizierten Objekte durchgeführt. Hierzu werden iterativ alle Schnittpunkte zwischen den direkten Sichtlinien aller detektierten Objekte und allen detektierten Wänden bestimmt, und deren Lage relativ zu allen Wandlerpositionen

berechnet. Hierbei werden bereits detektierte Wände ebenfalls auf Basis ihrer charakteristischen Reflexionspunkte untersucht um auch partielle Verdeckungen detektieren zu können. Die Sichtlinien aller detektierten Objekte zu den Sensorpositionen der Wandleranordnung berechnen sich nach:

$$\text{view}_{i,j} = \begin{pmatrix} x_i + \tau(x_i - x_j) \\ y_i + \tau(y_i - y_j) \end{pmatrix}. \quad (6.9)$$

Anschließend werden die Schnittpunkte aller Kombinationen aus detektierten Wänden und restlichen Objekten gebildet:

$$S_i = \begin{pmatrix} x_i + \frac{(y_s - y_{Ti})(x_e - x_s) + (x_{Ti} - x_s)(y_e - y_s)}{(y_{Ti} - y_P)(x_e - x_s) - (x_{Ti} - x_P)(y_e - y_s)}(x_i - x_j) \\ y_i + \frac{(y_s - y_{Ti})(x_e - x_s) + (x_{Ti} - x_s)(y_e - y_s)}{(y_{Ti} - y_P)(x_e - x_s) - (x_{Ti} - x_P)(y_e - y_s)}(y_i - y_j) \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

Wobei x_s und y_s den Startpunkt und entsprechend x_e und y_e den Endpunkt einer erkannten Wand bezeichnen

Die Entscheidung über die Sichtbarkeit eines Objektpunkts erfolgt schließlich zum einen über den Vergleich der Distanz des Schnittpunkts zur Wandlerposition mit der Distanz zwischen Wandlerposition und Objektpunkt:

$$C = \begin{cases} 1 & \text{für } \sqrt{(x_s - x_{Ti})^2 + (y_s - y_{Ti})^2} \leq d_i \\ 0 & \text{für } \sqrt{(x_s - x_{Ti})^2 + (y_s - y_{Ti})^2} > d_i \end{cases}, \quad (6.11)$$

und zum anderen über eine Plausibilisierung der Position des Schnittpunkts im Bezug zur Position des zu überprüfenden Objekts bzw. der zu überprüfenden Wand. Liegt der Betrag der Laufvariablen der Geradengleichung der zu überprüfenden Wand für den überprüften Schnittpunkt außerhalb der als Wand detektierten Abmessungen so kann von einer freien Sichtlinie hinsichtlich der überprüften Wand ausgegangen werden. Der zulässige Bereich für eine Verdeckung ergibt sich aus (6.9):

$$0 \leq \tau \leq \frac{x_W - x_s}{x_e - x_s}. \quad (6.12)$$

Liegt der Schnittpunkt außerhalb der Abmessungen der detektierten Wand oder zwischen Wand und Wandler so liegt keine Verdeckung vor.

Abbildung 29 veranschaulicht das beschriebene Verfahren zur Sichtbarkeitsprüfung.

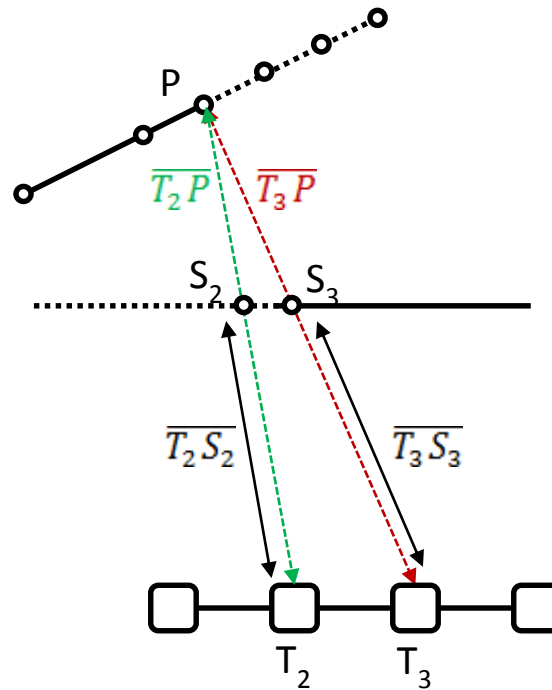


Abbildung 29: Bestimmung der Sichtbarkeit

6.5.3 Selektive Unterdrückung von Echoanteilen

Wie in Kapitel 2.2.4 erläutert wurde, können Ortungsverfahren, welche auf der Kombination mehrerer gemessener Abstände von räumlich verteilten Sensoren basieren, wie z.B. die Trilateration in Mehrpunkt-Situationen mehrdeutige Ergebnisse liefern. Diese Mehrdeutigkeit rührt zumeist von der Summation bzw. Multiplikation der Radien unterschiedlicher Objekte her, deren Gewicht unter Umständen nicht klar von realen Objekten zu trennen ist. Besonders deutlich wird der Störeinfluss in Gegenwart von ausgedehnten Reflektoren wie etwa Wänden, da diese bei voller Beleuchtung durch ein Array mit vier Wandlern zehn Radien generieren, welche die Detektion von Punktzielen erschweren. Hinzu kommt, dass ausgedehnte Reflektoren aufgrund des großen Rückstreuquerschnitts in der Regel auch in großer Entfernung die Detektionsschwelle überschreiten. Als Konsequenz können durch die so generierten Radien alle Radien näherliegender Ziele abhängig von der geometrischen Positionierung und Ausrichtung der Objekte zueinander potentiell gestört werden. Abbildung 30 verdeutlicht dies am Beispiel einer Messung von zwei Punktstreuern vor zwei winklig angeordneten Wänden.

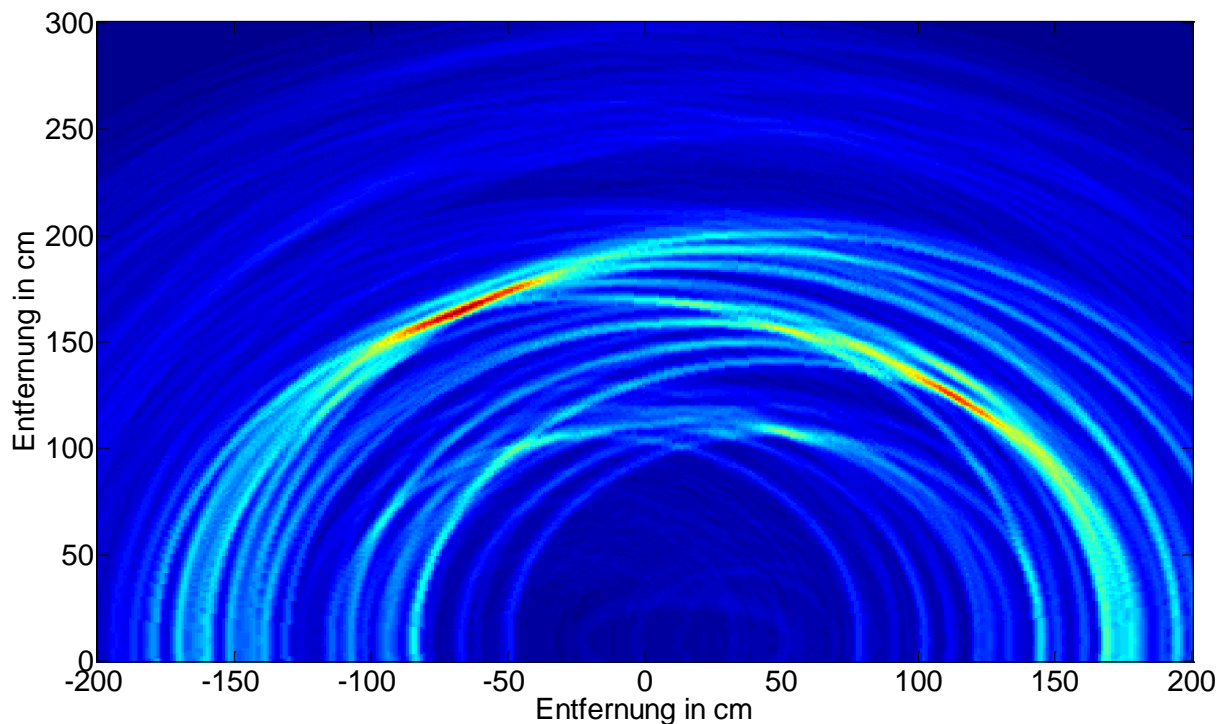


Abbildung 30: Ergebnis einer Trilateration mit mehreren Objekten

Die inverse Anwendung der Zuordnungstabellen des entwickelten Verfahrens liefert die charakteristischen Laufzeiten detektierter Objekte und bietet die Möglichkeit, die betroffenen Signalanteile der empfangenen Echoprofile zu dämpfen bzw. gänzlich zu eliminieren. Die Entfernung der identifizierten Signalanteile kann dabei über eine einfache Unterdrückung des Signals auf Breite des verwendeten Sendepulses um die ermittelte Laufzeit herum oder über die Subtraktion eines entfernungskompensierten Normechos erfolgen. Eine simple Unterdrückung ergibt sich nach:

$$S\left(\tau - \frac{t_p}{2} \dots \tau + \frac{t_p}{2}\right) = 0. \quad (6.13)$$

Die komplette Unterdrückung des Signals zum ermittelten Zeitpunkt birgt jedoch die Gefahr koinzidente Echos zusätzlicher reflektierender Objekte mit auszulöschen und somit Signalinformation für die weitere Auswertung zu verwerfen. Jedoch ist diese Form der Signalkonditionierung für die meisten Anwendungsszenarien ausreichend, da koinzidente Echos nur in sehr beengten Umgebungen mit mehreren Objekten zu erwarten sind.

Bei der Dämpfung des betroffenen Signalbereichs durch a priori bestimmte Normpulsformen lässt sich dieser Effekt vermeiden. Die Bestimmung der Signalform kann dabei sowohl

empirisch als auch mathematisch erfolgen. Der so gewonnene Amplitudenverlauf für ein typisches Echo eines reflektierenden Objekts kann dann entsprechend der Freiraumdämpfung und dem Rückstreuquerschnitt des Objekts gewichtet und vom empfangenen Signal subtrahiert werden:

$$S\left(\tau - \frac{t_p}{2} \dots \tau + \frac{t_p}{2}\right) = S\left(\tau - \frac{t_p}{2} \dots \tau + \frac{t_p}{2}\right) - S_{\text{norm}} \cdot \alpha(d). \quad (6.14)$$

Auf diese Weise werden pro Iteration des verarbeitenden Algorithmus nur Signalanteile eines reflektierenden Objekts aus dem Echoprofil entfernt. Da in der Regel keine Informationen über den Rückstreuquerschnitt der beleuchteten Objekte vorliegen ist eine Bestimmung der Amplitude des Normechos nicht ohne weiteres möglich. Diesem Nachteil kann bei bewegten Wandlern oder Objekten durch eine zeitliche Verfolgung der Objekte begegnet werden. Fasst man die Signale mehrerer sukzessiver Messungen unter Berücksichtigung der Wandlerbewegung bzw. eines Plausibilisierungsfensters für die Objektbewegung zusammen so können Einschätzungen über die Rückstreuquerschnitte der einzelnen Objekte getroffen werden. Weiterhin sollte eine plötzliche Koinzidenz über einen Sprung in der Amplitude, sowie eine graduelle Koinzidenz durch das beschriebene Objekttracking detektierbar sein.

Durch die beschriebene Signalkonditionierung können die Störeinflüsse gezielt entfernt werden, wodurch die Eindeutigkeit des erhaltenen Ergebnisses gesteigert wird. Abbildung 31 zeigt die Situation aus Abbildung 30 nach der Unterdrückung der erkannten Wand.

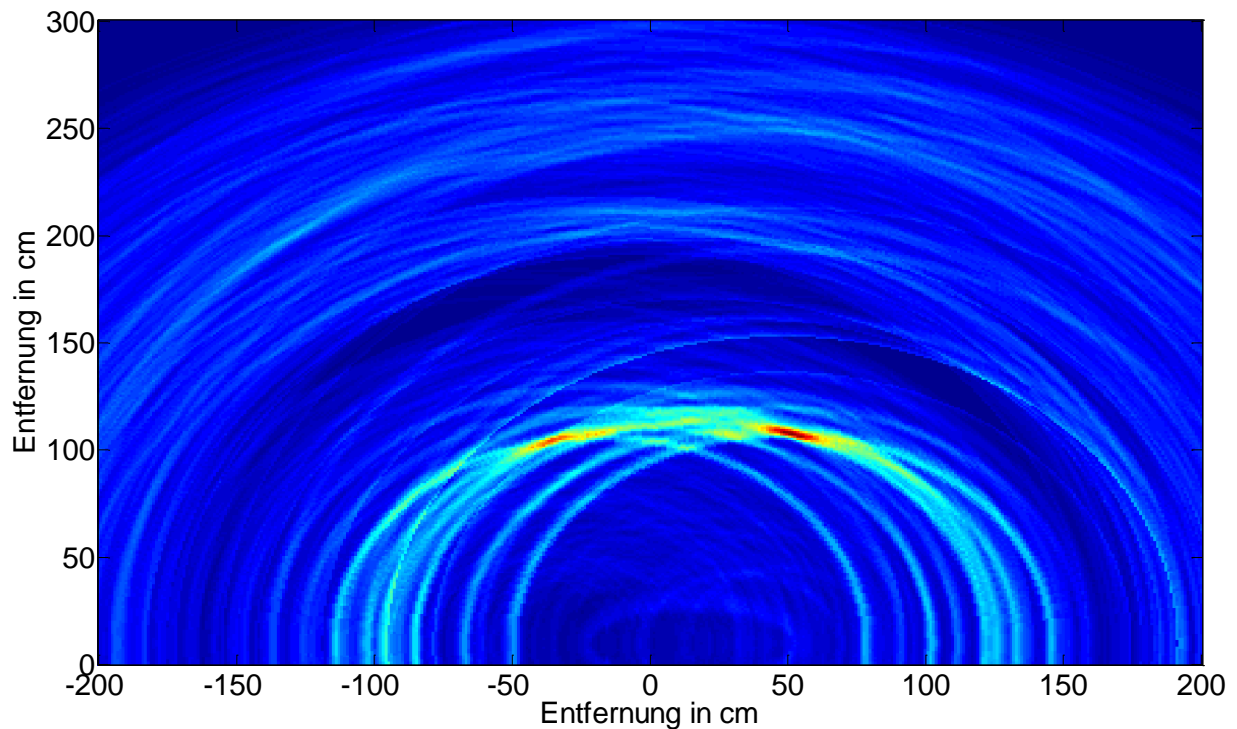


Abbildung 31: Ergebnis nach Unterdrückung

Das beschriebene Verfahren zur Reduktion der Störeinflüsse prägt der Objektlokalisierung einen iterativen Charakter auf, wodurch ein Wechsel von der additiven zur multiplikativen Überlagerung der Echoprofile möglich wird. Das multiplikative Verfahren lässt sich in der Regel für Mehrobjekt-Situationen nur schwer umsetzen, da aufgrund des hohen Kontrasts nur das dominante Ziel erkannt wird. Durch die Unterdrückung des dominanten Ziels nach der Erkennung können die Echoprofile sukzessive auf das stärkste Objekt hin untersucht und dessen Signalanteile anschließend unterdrückt werden, bis keine Objekte oberhalb einer definierten Schwelle mehr detektiert werden. Der iterative Ansatz ist rechenaufwändiger als die laufzeitrichtige Addition, bietet dafür aber einen wesentlich höheren Kontrast.

6.5.4 Synthetische Wandleranordnung

Das entwickelte Verfahren ist nicht auf physikalische Wandleranordnungen beschränkt und kann ebenso bei, von einem, durch Relativsensorik gestützten Einzelwandler aufgespannten, zeitlichen Wandleranordnungen eingesetzt werden. Diese Tatsache ist für die Umgebungsabbildung quer zur Fahrtrichtung von besonderer Bedeutung, da für die Erfassung dieses Bereichs in der Regel maximal ein bis zwei Ultraschallwandler zur Verfügung stehen deren Basisabstand den Empfang von Kreuzechos unmöglich macht. Die Kombination mehrerer aufeinander folgender Messungen auf Rohsignalebene ist aus der Radarwelt als synthetisches-Apertur-Radar [68] bekannt und findet dort vielfältigen Einsatz bei der Erdvermessung [69] und militärischen Überwachungsanwendungen [70]. Wie schon zuvor verzichtet das vorgestellte Verfahren auf eine Auswertung der Signalphase, da diese im Allgemeinen bei heutigen Ultraschallsystemen im Fahrzeugbereich nicht zur Verfügung steht.

Im Gegensatz zu physikalischen Mehrwandleranordnungen entfallen bei zeitlich versetzten Messungen eines Einzelwandlers die Informationen der Quermessungen, wodurch die Anzahl der charakteristischen Reflexionspunkte bei konstanter Anzahl an Stützstellen abnimmt. Im Gegenzug bietet sich jedoch die Möglichkeit durch die hohe Messfrequenz und die zurückgelegte Strecke deutlich stärker besetzte Wandleranordnungen mit größerer Ausdehnung zu generieren. Abbildung 32 zeigt die sich ergebenden Übertragungswege qualitativ.

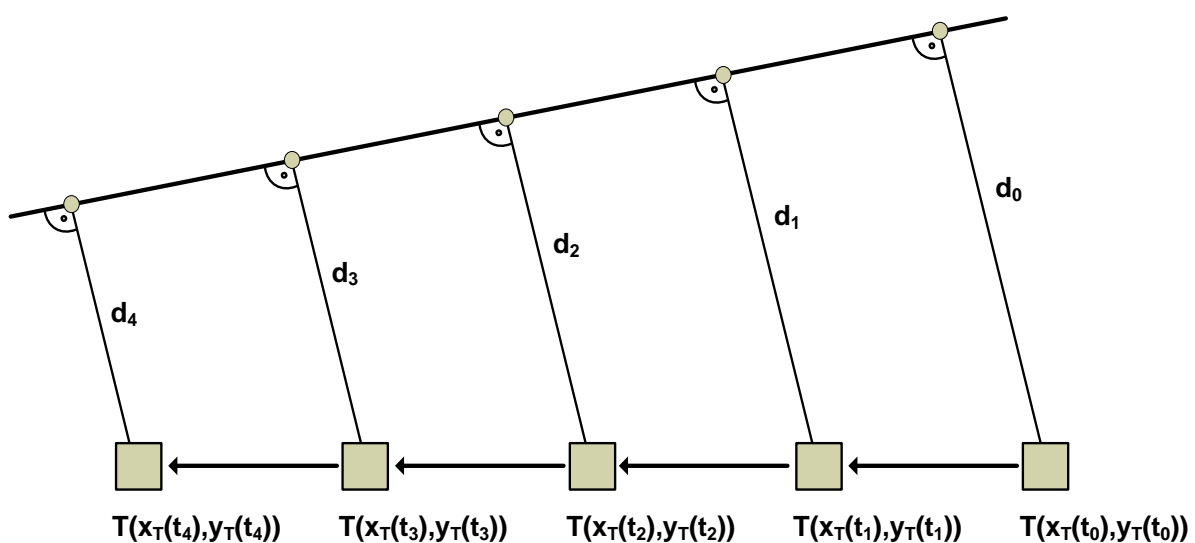


Abbildung 32: Charakteristische Punkte bei bewegtem Wandler

Die maximale Ausdehnung L_T einer zeitlich aufgespannten Wandleranordnung ergibt sich in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel ζ der verwendeten Sensoren und dem Abstand R_T zum beleuchteten Objekt nach [71] :

$$L_T = \frac{2 \cdot R_T}{\tan\left(\frac{(\pi - \zeta)}{2}\right)} \quad (6.15)$$

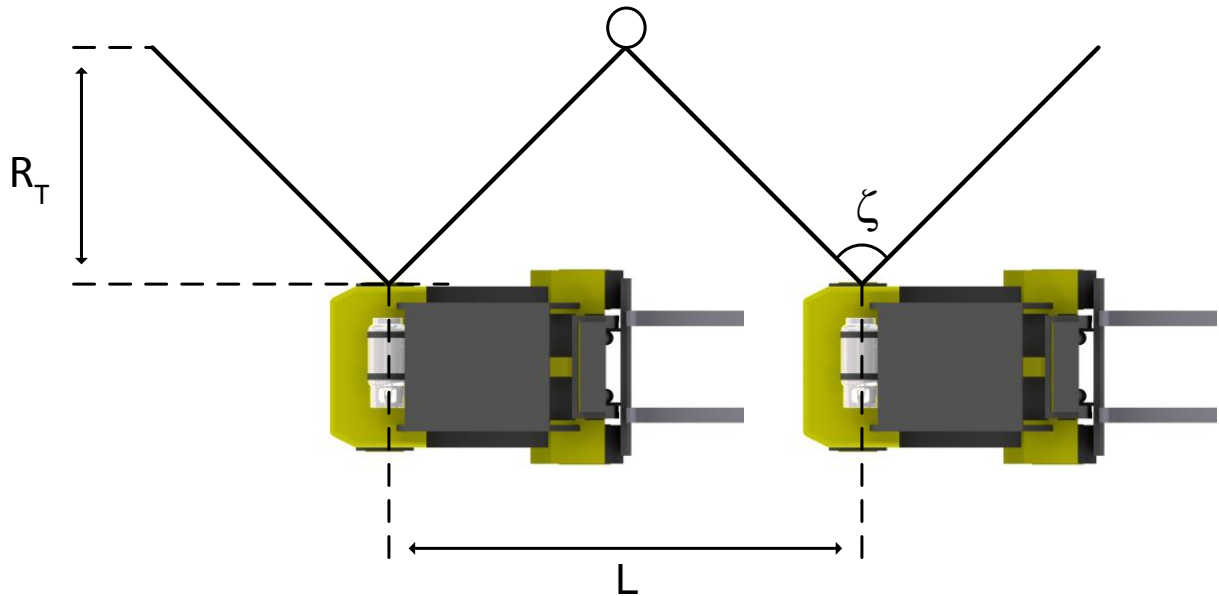


Abbildung 33: Schema synthetische Wandleranordnung

Im Gegensatz zu einer physikalischen Anordnung mehrerer Wandler können die Zuordnungstabellen bei einem einzelnen bewegten Wandler nicht a priori berechnet, sondern müssen für jeden Messpunkt neu generiert werden. Dies stellt einen nicht unerheblichen Rechenaufwand dar, da für jede Wandlerposition:

$$\frac{d}{\delta_d} \cdot \frac{\alpha}{\delta_\alpha} \cdot 10, \quad (6.16)$$

im vorliegenden Fall 450000 Signallaufzeiten berechnet werden müssen. Die so generierte Rechenlast kann jedoch unter Verwendung einer einzelnen a priori generierten Zuordnungstabelle deutlich reduziert werden. Der Winkelbereich dieser Zuordnungstabelle entspricht dabei einer kompletten 360° Drehung des Wandlers. Im Gegensatz zur kompletten Neuberechnung der Zuordnungstabelle müssen nun lediglich die notwendigen Änderungen

von Wandlerposition zu Wandlerposition berechnet werden. Die zu berechnenden Änderungen der Zuordnungstabelle ergeben sich nach:

$$\Delta_d(\alpha) = \cos(\alpha) \cdot \Delta_x + \sin(\alpha) \cdot \Delta_y, \quad (6.17)$$

und belaufen sich im vorliegenden Fall auf 180 Berechnungen. Die reale Translation und Rotation des Wandlers führen im Parameterraum zu einer winkelabhängigen Änderung Δ_d des Abstands d_L bzw. einer Translation des kompletten Parameterraums um den Betrag des Rotationswinkels. Die winkelabhängige Längenänderung der Lotgeraden wird zur bestehenden Zuordnungstabelle addiert und anschließend das aktive Fenster des Parameterraums welches eine Breite von 180° besitzt entsprechend der Rotation des Wandlers im Vergleich zur vorherigen Wandlerposition über die Zuordnungstabelle verschoben. Für eine fortlaufende Messung ist es erforderlich den Referenzpunkt für die Überlagerung der einzelnen Messungen stetig nachzuführen. Wird die vom Wandler überstrichene Entfernung zu groß so wird der Parameterraum derart verzerrt, dass aufgrund des Auflösungsverlusts bezüglich des Winkels keine eindeutigen Ergebnisse erhalten werden können. Abbildung 34 zeigt den beschriebenen Effekt für eine zurückgelegte Distanz von 0m bzw. 5,18m.

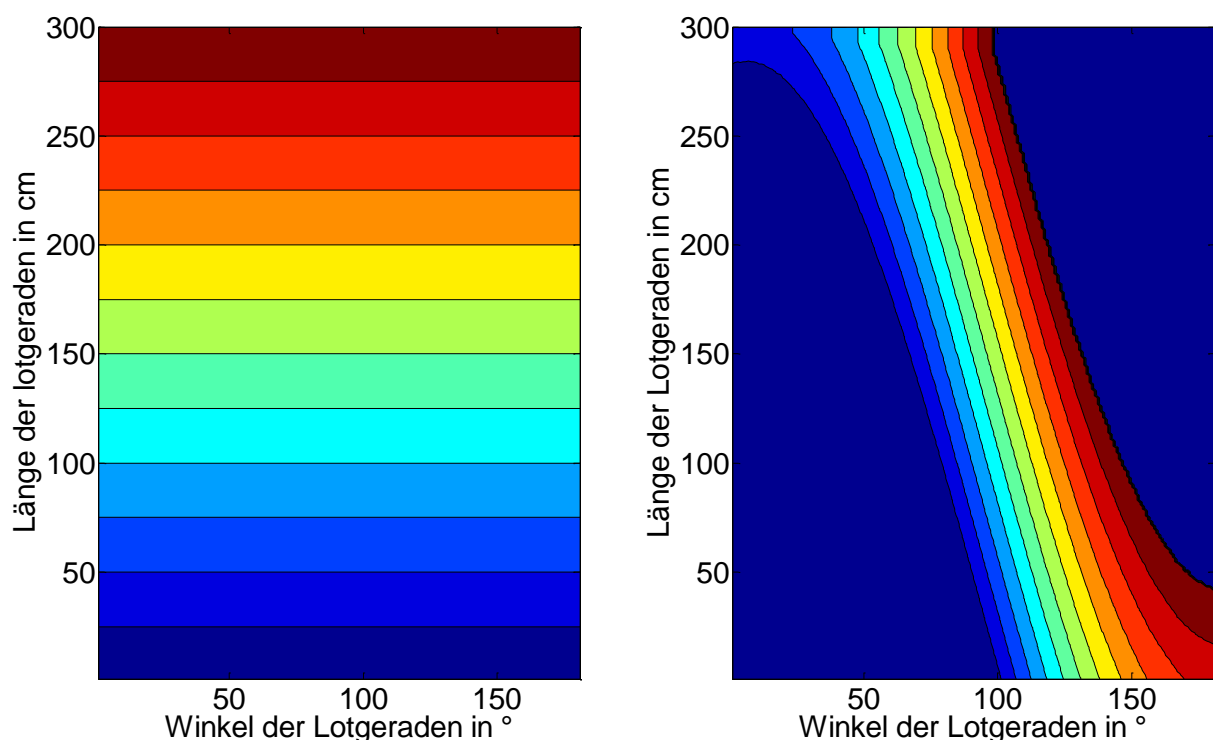


Abbildung 34: Verzerrung des Parameterraums für 0m (links) und 5,18m (rechts)

Bei gleitender Verarbeitung einer fest vorgegebenen Anzahl aufgenommener Signale kann der beschriebene Effekt umgangen werden. Dabei wird dem Auswertefilter jeweils eine neue

Messung hinzugefügt, die älteste Messung entfernt und der Referenzpunkt auf die Position der nun ältesten Messung verschoben. Die Anzahl der auszuwertenden Messungen hängt direkt von der überstrichenen Distanz des Fahrzeugs, also von dessen Geschwindigkeit, der Messfrequenz des eingesetzten Wandlers und der hinsichtlich der Verzerrung des Parameterraums maximal zurücklegbaren Distanz ab:

$$N_{\text{zul}} = \frac{f_{\text{Mess}}}{v} \cdot D. \quad (6.18)$$

6.5.5 Rechenaufwand

Der Einsatz komplexer Signalverarbeitung, wie der in dieser Arbeit beschriebenen, zieht in der Regel einen hohen Rechenaufwand nach sich. Dieser Umstand erschwert den Echtzeitbetrieb solcher Verfahren bei gleichzeitiger Verhältnismäßigkeit der eingesetzten Hardware. So erfordert die Berechnung einer Abbildung nach der Hough-Transformation für eine Wandleranordnung mit vier Wandlern, die Verwendung von vorberechneten Lookup-Tabellen vorausgesetzt, für die Bildgenerierung:

$$N_{\text{Bild}} = \frac{X}{\delta_x} \cdot \frac{Y}{\delta_y} \cdot 10, \quad (6.19)$$

Additionen. Hierbei bezeichnen X und Y jeweils die Ausdehnung des zu überwachenden Bereichs in horizontaler bzw. vertikaler Richtung sowie δ_x und δ_y deren Auflösung. Der Algorithmus nach Hough benötigt wiederum unter der Vorgabe einer Verwendung vorberechneter Lookup-Tabellen zusätzlich:

$$N_{\text{Hough}} = \frac{\alpha}{\delta_\alpha} \cdot \frac{X}{\delta_x} \cdot \frac{Y}{\delta_y}, \quad (6.20)$$

Additionen mit α als zu untersuchendem Winkelbereich für die Geraden und δ_α als dessen Auflösung um den so generierten Bildraum auf eine Objektklasse hin zu untersuchen. Die Gesamtheit der notwendigen Additionen ergibt sich also als Summe beider Operationen zu:

$$N_{\text{Gesamt}} = \frac{\alpha}{\delta_\alpha} \cdot \frac{X}{\delta_x} \cdot \frac{Y}{\delta_y} \cdot 11 \quad (6.21)$$

Die notwendigen Dimensionen d_L und α des Parameterraums um eine Überwachung des durch X und Y definierten Bildraums zu garantieren ergeben sich aus dem Winkelbereich der Hough-Transformation und dem Radius des Umkreises des Bildraums:

$$d_{L,max} = \sqrt{\left(\frac{X}{2}\right)^2 + Y^2} \quad (6.22)$$

Die Berechnung eines Parameterraums für die Objektdetektion nach dem Ansatz eines Optimalfilters ergibt sich dann aus:

$$N_{Filter} = \frac{\sqrt{\left(\frac{X}{2}\right)^2 + Y^2}}{\delta_{d_L}} \cdot \frac{\alpha}{\delta_\alpha} \cdot 10 \quad (6.23)$$

Additionen mit δ_d als Auflösung des Parameterraums in der Dimension d.

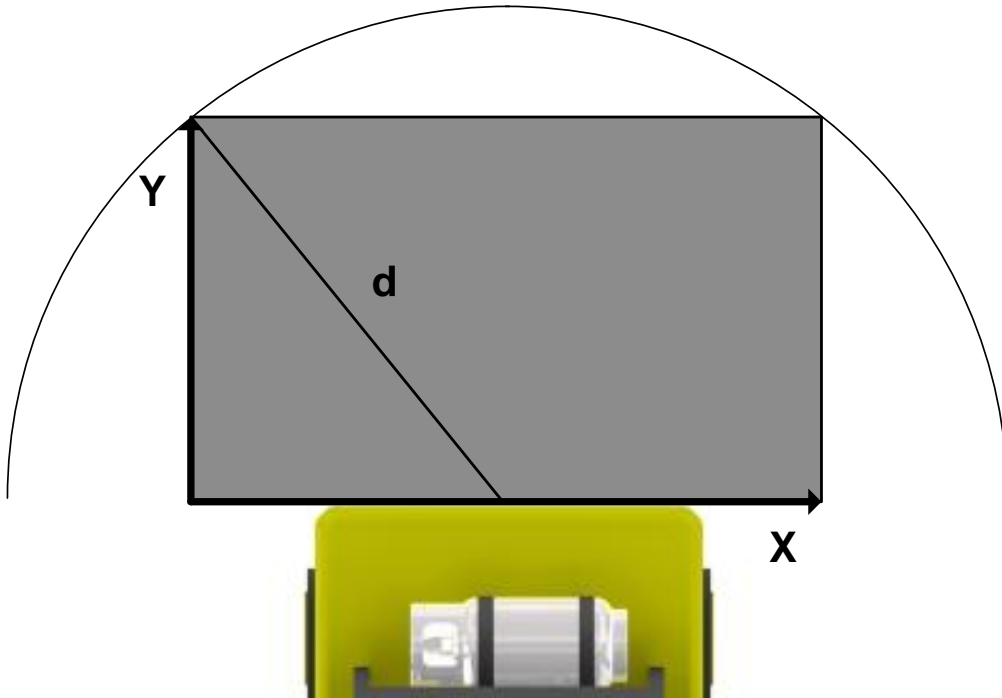


Abbildung 35: Beziehung überwachter Bereich Bildraum und Parameterraum

Setzt man den notwendigen Rechenaufwand beider Algorithmen ins Verhältnis erhält man:

$$\frac{N_{Gesamt}}{N_{Filter}} = \frac{\frac{\alpha}{\delta_\alpha} \cdot \frac{X}{\delta_x} \cdot \frac{Y}{\delta_y} \cdot 11}{\frac{\sqrt{\left(\frac{X}{2}\right)^2 + Y^2}}{\delta_{d_L}} \cdot \frac{\alpha}{\delta_\alpha} \cdot 10} \quad (6.24)$$

Der Gewinn an Rechenzeit steigt unter Annahme eines quadratischen Bildraums linear direkt proportional zu den Dimensionen des auszuwertenden Bildraums bzw. der verwendeten Auflösung.

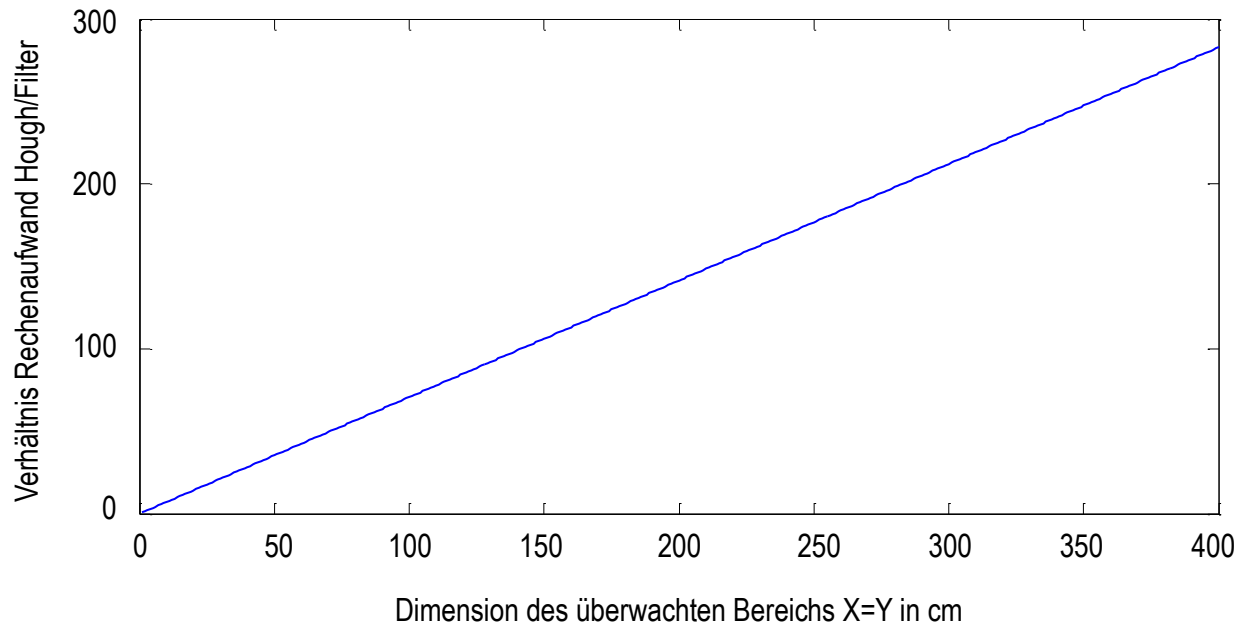


Abbildung 36: Verhältnis der notwendigen Rechenoperationen für $\delta=0.01m$

Für einen Bildraum von $2m \times 2m$ und einer Auflösung von $\delta_x = \delta_y = 0,01m$ ergibt sich ein theoretisches Verhältnis von:

$$\frac{N_{\text{Gesamt}}}{N_{\text{Filter}}} = 196, \quad (6.25)$$

notwendiger Rechenoperationen zur Berechnung einer Lösung. Der entwickelte Filteralgorithmus erzielt also einen um den Faktor 196 reduzierten Rechenaufwand und erleichtert dadurch eine Implementation als echtzeitfähiges System.

7 Systemaufbau

Für die Erprobung des beschriebenen Verfahrens wurde ein Versuchsträger auf Basis eines Handwagens mit Achsschenkelenkung entwickelt. Der Versuchsträger wurde mit einem selbstentwickelten vierkanaligen Ultraschallmesssystem sowie mit unterstützender Relativsensorik und einem Kamerasystem ausgerüstet. Die Signalverarbeitung zur Objektdetektion wurde auf einem mobilen Rechner in Matlab realisiert. In Abbildung 37 und Abbildung 38 sind die Systemaufbauten für physikalische und synthetische Wandleranordnungen als Blockschaltbilder dargestellt.

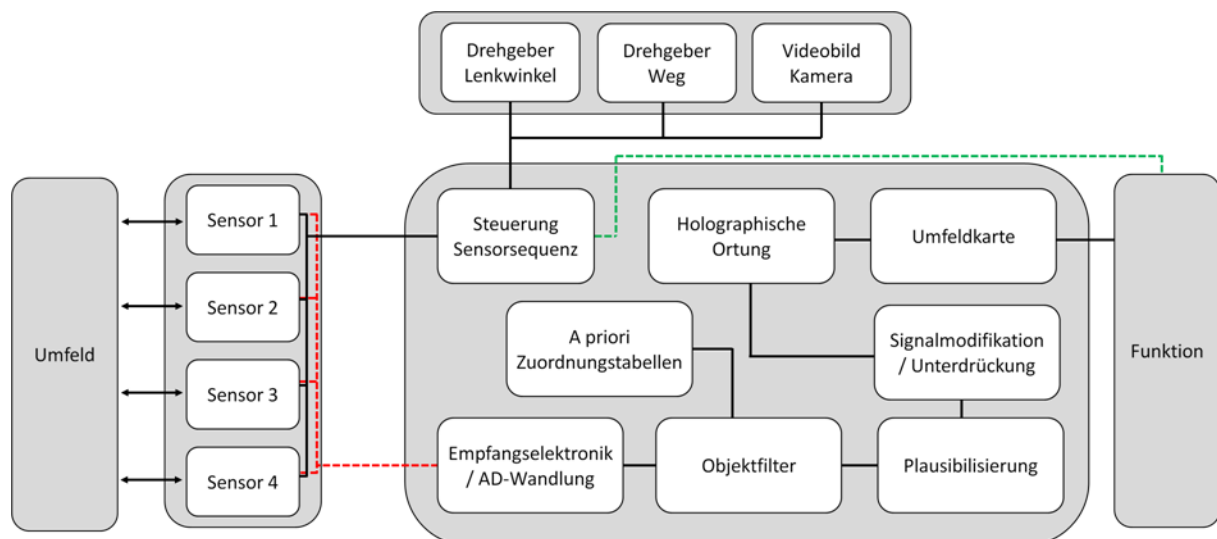


Abbildung 37: Systemschaltbild Wandleranordnung

Die Funktion, ein Kollisionswarner etwa, löst eine Umfeldabbildung aus, wodurch die synchrone Aufzeichnung der Positionsänderung sowie der unterschiedlichen Sensorsequenzen zur Erfassung der Umfeldinformation von der Sequenzsteuerung initiiert wird. Die von der Wandleranordnung gesammelte Signalinformation wird zur Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses zunächst elektronisch auf den relevanten Frequenzbereich gefiltert und anschließend in Digitaldaten umgesetzt. Die so gewonnenen digitalen Daten werden durch das in Abschnitt 6.3.1 beschriebene Objektfilter verarbeitet und eine Objektliste generiert. Die identifizierten Objekte werden anschließend auf ihre Sichtbarkeit hin Plausibilisiert und aus den Empfangssignalen entfernt. Die so bereinigten Signale stellen wiederum die

Eingangsgröße für die holographische Ortung dar, welche wiederum ein Objektfilter für Punktziele repräsentiert. Die hieraus erhaltene Objektliste wird mit der zuvor vom Objektfilter bestimmten Objektmenge kombiniert und in eine Fahrzeug bzw. sensorfeste oder auch absolute Umfeldkarte eingetragen und an die Funktion übermittelt.

Aus Abbildung 38 ist gut zu erkennen, dass das Objektfilter im Unterschied zur zuvor beschriebenen Systemkonfiguration zwingend die Trajektorieninformation der beiden Drehgeber zur Berechnung einer Lösung benötigt. Das System besitzt nur eine einzelne Zuordnungstabelle, welche entsprechend der Positionsänderung des Sensorelements modifiziert wird. Ein weiterer Unterschied besteht im Wegfall des zweiten Objektfilters, da in diesem Fall nur Objektkonturen abgebildet werden sollen, welche wiederum durch kurze Linienabschnitte angenähert werden.

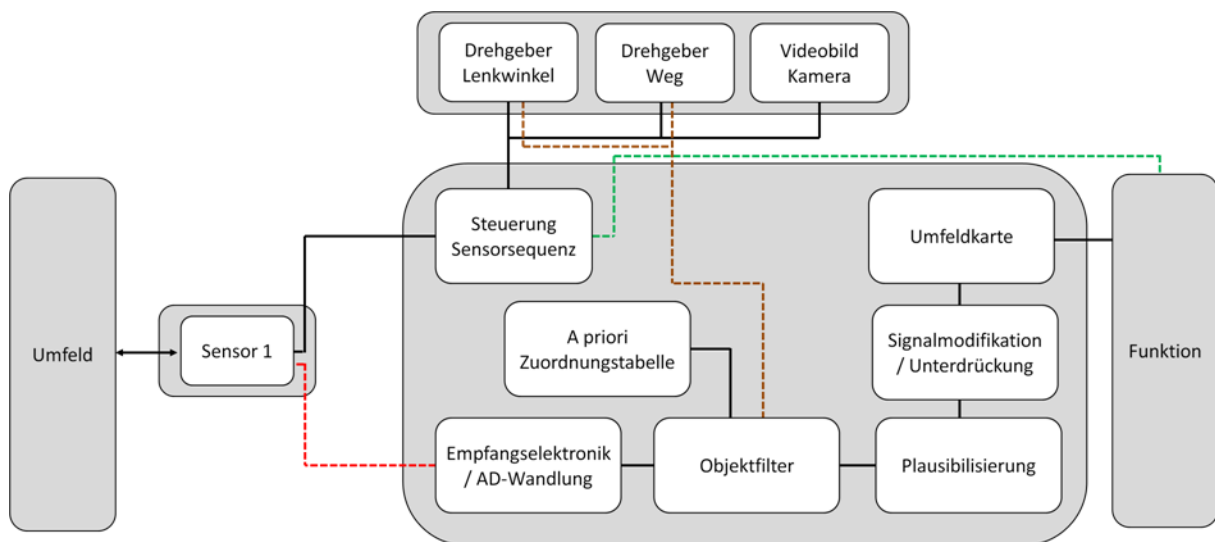


Abbildung 38: Systemschaltbild Einzelwandler

7.1 Verwendete Ultraschallsensorik

Das Einsatzgebiet des untersuchten Systems liegt im industriellen Umfeld weshalb besondere Randbedingungen sowohl hinsichtlich der mechanischen Robustheit, als auch in Bezug auf Verschmutzung Anwendung finden. Die eingesetzten Ultraschallwandler müssen eine hohe Toleranz gegenüber impulsförmiger Krafteinwirkung, Nässe und Ablagerungen durch Abgase und Staub aufweisen. Aufgrund der genannten Anforderungen wurden in Aluminium verkapselte, wasserdichte Ultraschallwandler eingesetzt [72].

Im Gegensatz zu Membranschwingern auf Basis von PVDF-Folien besitzt dieser piezokeramische Wandlertyp eine hohe Differenz zu Gasen bezüglich der akustischen Impedanz. Aus diesem Grund sind derartige Ultraschallwandler bei der Abstrahlung von Kompressionswellen in Luft gezwungen vergleichsweise hohe Amplituden zu erzeugen um noch ausreichend Energie in das Medium auszukoppeln. Diese Tatsache hat zusätzlich direkten Einfluss auf die Sensitivität des Wandlers, da im Umkehrschluss ebenfalls verhältnismäßig starke Kompressionswellen notwendig sind um noch detektiert zu werden. Derart hohe Verformungen sind bei einer ausschließlichen Verwendung piezokeramischer Wandlerelemente nur schwer zu erreichen.

Aus diesem Grund wird die Umsetzung der Forderung nach hohen Amplituden bei dieser Art von Ultraschallwandlern über eine mechanische Verstärkung der piezokeramischen Anregung realisiert. Als Verstärker dient eine metallische Trägermembran auf welche das scheibenförmige Piezoelement flächig verklebt wird. Die durch das Anlegen eines Spannungssignals hervorgerufenen Änderungen des Durchmessers der Keramik werden durch die starre Kopplung in eine Biegeschwingung der metallischen Membran überführt. Bei Anregung mit der Resonanzfrequenz des Verbundsystems sind auf diese Weise deutlich höhere Amplituden zu erreichen. Weiterhin werden durch einfallende Druckwellen hervorgerufene Biegeschwingungen der Membran direkt auf eine Durchmesseränderung des Piezoelements übertragen wodurch die Sensitivität stark verbessert wird.

Die Fixierung der so generierten Membran wird zumeist über deren Ausführung als metallischer Zylinder oder Kegel realisiert, wobei der Mantel die Fixierung für den Boden darstellt. Bei Anregung der Membran nimmt der fixierende Mantel in begrenztem Umfang an der Auslenkung teil, weshalb eine Behinderung der Mantelbewegung im Gegenzug direkt die Schwingung des Bodens beeinflusst. Aus diesem Grund muss sorgfältig auf die Entkopplung der gesamten Wandlerstruktur vom aufnehmenden Gehäuse geachtet werden um eine

optimale Abstrahlung zu garantieren. Abbildung 35 zeigt einen der verwendeten Wandler mit angeschlossener Coaxialleitung sowie deren schematischen Aufbau.

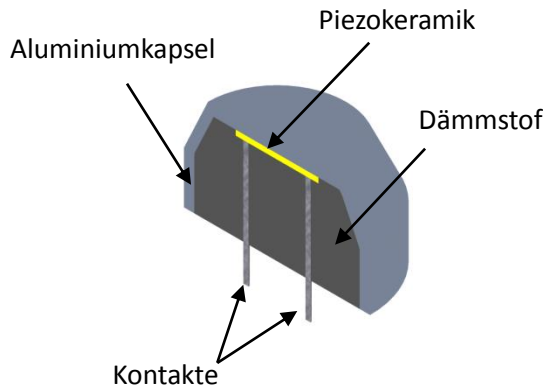


Abbildung 39: Verwendeter Ultraschallwandler

Die Arbeitsfrequenzen aktuell eingesetzter Ultraschall-Abstandswarnsysteme bewegen sich im Bereich von 40-55 kHz und werden vor allem durch zwei gegenläufige Faktoren bestimmt. Zum einen besteht die Forderung nach möglichst hoher effektiver Reichweite des Systems zum anderen sollen Quereinflüsse aus der Fahrzeugumgebung minimiert werden. Die Arbeitsfrequenz der verwendeten Wandler liegt am unteren Ende des beschriebenen Frequenzbereichs bei 40 kHz mit einer Bandbreite von 2 kHz. Der gewählte Frequenzbereich vermeidet den mit einer Vielzahl von Störschallquellen besetzten Bereich des menschlichen Hörschalls bei gleichzeitig moderater Luftschalldämpfung und bildet damit einen guten Kompromiss hinsichtlich beider Forderungen.

Weiterhin ist die Richtcharakteristik der eingesetzten Wandler ein bedeutender Faktor für die Qualität der Umgebungsabbildung. Bei Ultraschall-Warnsystemen werden uniforme Schallfelder über hohe Winkelbereiche angestrebt. Die -3 dB Öffnungswinkel solcher Wandler bewegen sich je nach Anwendungsgebiet zwischen 60° und 140°. Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Wandler besitzen einen -6dB Öffnungswinkel von 85° in vertikaler und horizontaler Richtung.

7.2 Entwickelte Elektronik

Ultraschallbasierte Umfeldüberwachungssysteme setzen sich zum einen aus den Wandlern und zum anderen aus dem übergeordneten Steuergerät zusammen, welches in der Regel auch die Auswertung der empfangenen Signale übernimmt. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde ein Sensorsystem bestehend aus vier Ultraschallsensoren und einer Platine zur zeitsynchronen Ansteuerung der Wandleranordnung aufgebaut. Die Forderung nach einer möglichst genauen Synchronisierung der Sendezeitpunkte ist eine Grundvoraussetzung zur Nutzung der Querechos zwischen den Wandlern. Der Aufbau des Gesamtsystems wurde dabei modular gestaltet um eine möglichst hohe Flexibilität zu gewährleisten.

Das Kernstück der Basisplatine und gleichzeitig die Schnittstelle zum übergeordneten Prozessrechner bildet ein mit 66 MHz getakteter 32-bit Mikrocontroller. Die Kommunikation mit dem Prozessrechner erfolgt über eine 750 kB/s USB-Verbindung die als virtueller Com-Port im System des übergeordneten Rechners angesprochen werden kann, wodurch die Kommunikation mit Rechnerseitiger Auswertesoftware deutlich erleichtert wird. Der Mikrocontroller verfügt über externes SDRAM und einen zusätzlichen peripheren Chipsatz zum Anschluss eines Monitors und einer Tastatur. Die Spannungsversorgung der Platine ist aufgrund des installierten Linearreglers theoretisch in einem weiten Bereich möglich. Abbildung 40 hebt die beschriebenen Bereiche der Basisplatine hervor.

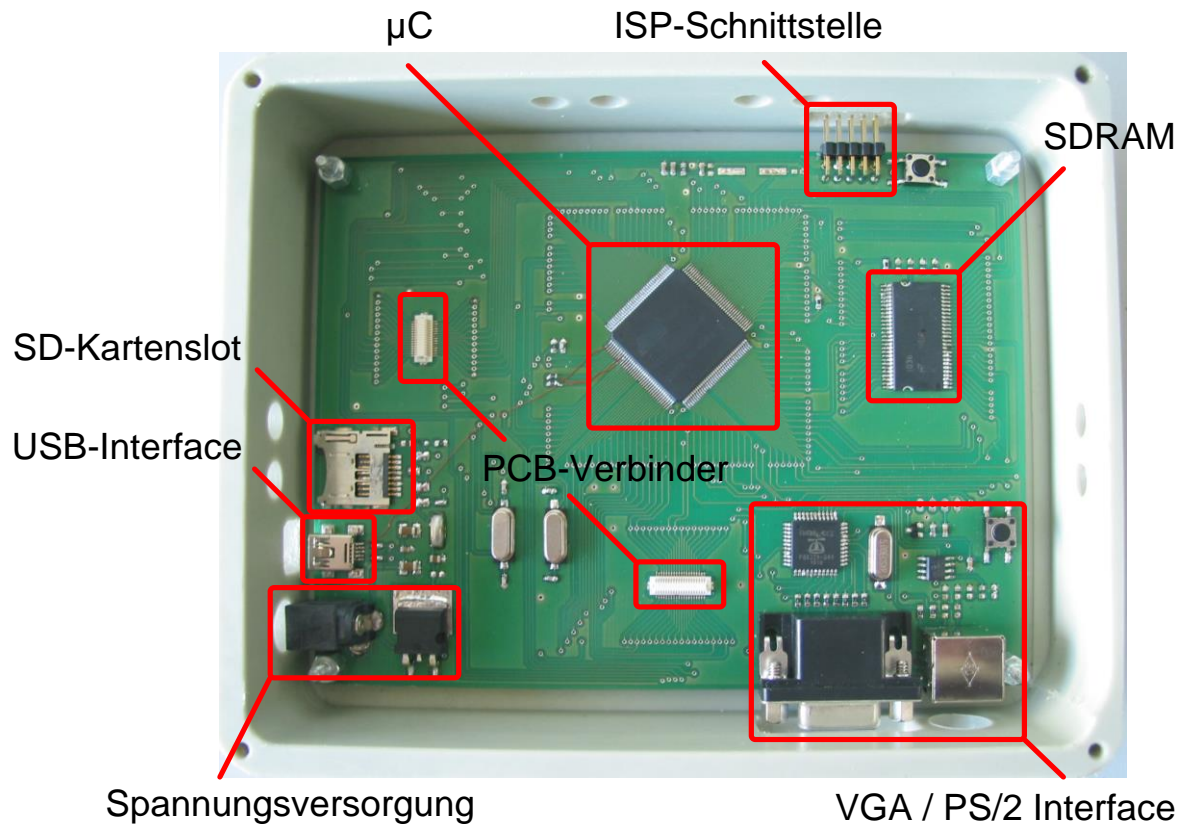


Abbildung 40: Basisplatte

Das Ultraschallmodul wird über zwei PCB-Verbinderstecker an die Basisplatte angekoppelt. Das Modul selbst besitzt vier spezielle Mikrocontroller, welche unter anderem auch speziell für Ultraschallanwendungen konzipiert wurden. Dies findet besonders im integrierten Empfangszweig der ICs bestehend aus einem extrem rauscharmen Eingangsverstärker, einem automatisch nachgeführten digitalen Bandpass, sowie einem nachgeschalteten 11-bit Sigma-Delta Analog-zu-Digital-Wandler und einem Hardware Hüllkurvendemodulator. Die Integration all dieser Komponenten in einem IC resultiert in einem hochsensitiven und dennoch relativ rauscharmen Empfangszweig. Zusätzlich befindet sich in jedem IC ein frei programmierbarer mit 16MHz getakteter 16-bit Mikrocontroller mit Registerzugriff auf verschiedene Signale entlang des Empfangszweigs. Abbildung 41 zeigt das Blockschaltbild des Empfangszweigs des verwendeten Ultraschall ICs.

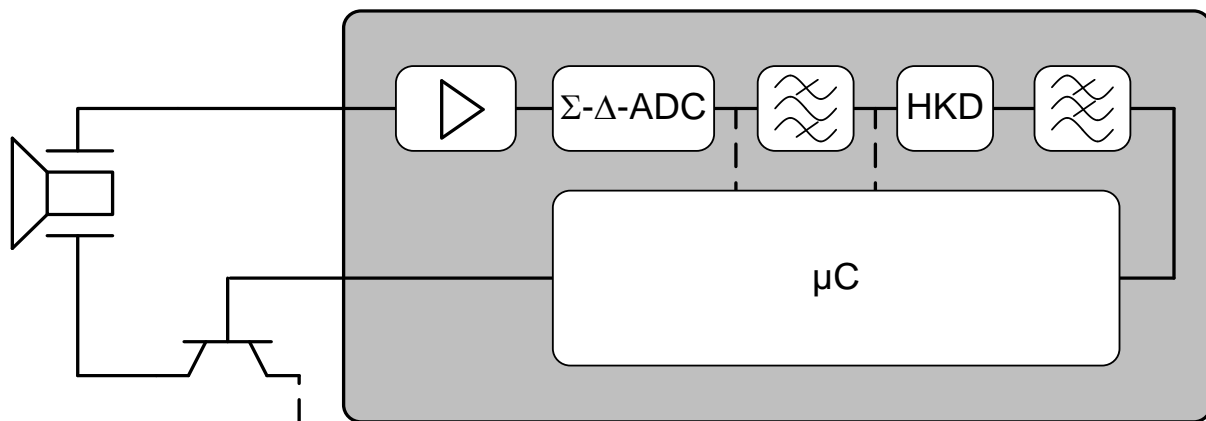


Abbildung 41: Aufbau Ultraschall IC

Die Spannung zum Betrieb der Ultraschallwandler wird durch einen Transformator erzeugt, dessen primärseitige Spannung von einem Kondensator bereitgestellt wird, welcher durch einen vom IC gesteuerten Transistor zugeschaltet werden kann. Auf diese Weise können Frequenzen in einem weiten Bereich durch die Schaltfrequenz des IC erzeugt werden. Die Wandler wurden mit einer Anregespannung von $\pm 100V$ betrieben.

Als Signalleitungen zu den Wandlern wurden Coaxial-Kabel verwendet um den Einfluss durch von außen einwirkende elektromagnetische Störungen auf einem Minimum zu halten.

Die Kommunikation zwischen dem 32-bit Mikrocontroller und den vier 16-bit Mikrocontrollern wurde über einen SPI-Bus realisiert. Alle vier Ultraschall ICs teilen sich die Sende- und Empfangsleitung zum Steuer IC und werden per exklusiver Steuerleitung adressiert. Die Geschwindigkeit der Datenübertragung zwischen den ICs beträgt 500 kB/s. Abbildung 42 zeigt das entwickelte Ultraschallmodul.

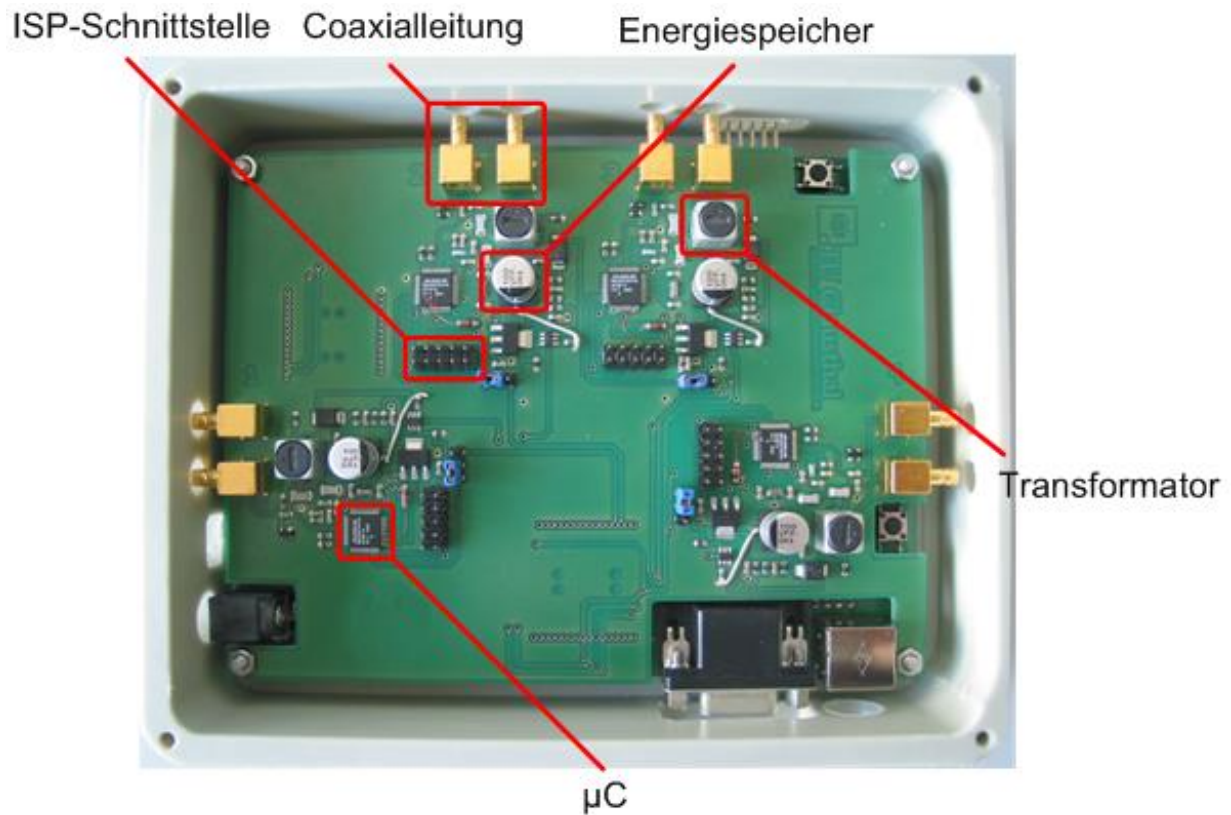


Abbildung 42: Ultraschallmodul

7.3 Versuchsplattform

Zur möglichst realitätsnahen Erprobung des entwickelten Verfahrens wurde eine mobile Messplattform entwickelt. Das Versuchsfahrzeug basiert auf einem Handkarren mit Achsschenkelenkung auf der Vorderachse wie er in der Logistik kleiner und mittelständischer Betriebe Anwendung findet. Zur Bestimmung der relativen Bewegung des Fahrzeugs wurden inkrementelle Drehgeber sowohl an der Deichsel als auch an einem der Räder der Starrachse installiert. Dies erlaubt die Erfassung des Lenkwinkels bzw. des zurückgelegten Wegs. Der Wagen besitzt Luftreifen mit einem Durchmesser von 26cm. Die Drehgeber besitzen jeweils zwei Tastköpfe zur Bestimmung der Drehrichtung und eine Auflösung von 1000 Impulsen pro Umdrehung. Die Analogsignale beider Drehgeber werden über eine selbstentwickelte

Schaltung ausgelesen, ausgewertet und anschließend per USB-Verbindung an den Prozessrechner versendet. Aus den Eckdaten des Wagens und der Drehgeber ergeben sich:

$$\delta_b = \frac{0,26m \cdot \pi}{1000} = 0,82\text{mm}, \quad (7.1)$$

als Auflösung der Wegerfassung sowie

$$\delta_\varepsilon = \frac{360^\circ}{1000} = 0,36^\circ, \quad (7.2)$$

für die Auflösung der Winkelerfassung. Abbildung 43 zeigt die Einbaupositionen der Drehgeber am entwickelten Versuchsträger.

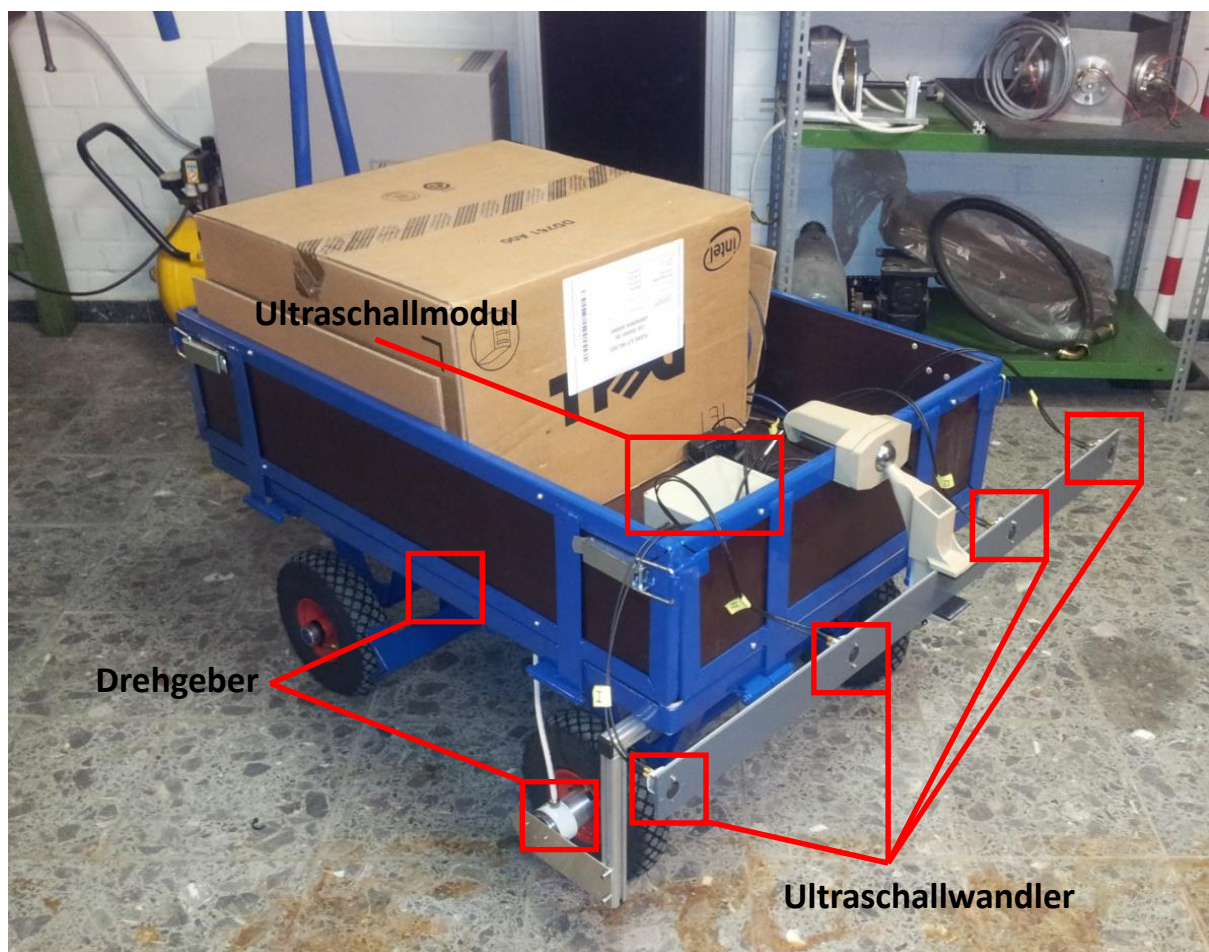


Abbildung 43: Messplattform

Zusätzlich wurde das Fahrzeug mit einer Kamera ausgerüstet um die Messsituation zu protokollieren und die Möglichkeit zur Wiedergabe der ermittelten Informationen über ein Augmented-Reality-Interface zu untersuchen.

7.4 Augmented Reality Interface

Als Bildaufzeichnungssystem wurde eine Webcam mit einem Aspektverhältnis von 16:10 bei einer Auflösung von 1280x800 Pixeln und einem diagonalen Öffnungswinkel von 60° eingesetzt. Dies entspricht einem horizontalen Öffnungswinkel von 51,8° und einem vertikalen Öffnungswinkel von 31,8°. Die Kamera wurde bei den Messungen der Vierwandleranordnung in einer Höhe von 60cm mittig in der Wandleranordnung angebracht. Für die Messungen des bewegten Einzelwandlers wurde die Kamera ebenfalls in 60cm Höhe direkt oberhalb des Einzelwandlers mit seitlicher Blickrichtung installiert.

Die mathematischen Beziehungen zur perspektivisch korrekten Einblendung von Informationen in das aufgenommene Bild ergeben sich aus der Optik und den Kameraparametern. Die entfernungsabhängige Höhe pro Bildpixel ergibt sich nach:

$$H_{px} = \frac{h_{bild}}{N_{pv}} \frac{2 \cdot \tan\left(\frac{\xi_v}{2}\right) d_c}{N_{pv}}, \quad (7.3)$$

wobei h_b den von der Kamera erfassten Vertikalbereich, ξ_v den vertikalen Öffnungswinkel der Kamera, d_c den Abstand zur Kamera und N_{pv} die Anzahl an Bildpixeln in vertikaler Richtung bezeichnen. Die entfernungsabhängige Breite berechnet sich analog unter Verwendung der horizontalen Bildauflösung und des horizontalen Öffnungswinkels:

$$B_{px} = \frac{b_{bild}}{N_{ph}} \frac{2 \cdot \tan\left(\frac{\xi_h}{2}\right) d_c}{N_{ph}}, \quad (7.4)$$

Abbildung 44 zeigt die beschriebenen mathematischen Beziehungen für die vertikale Bildkomponente.

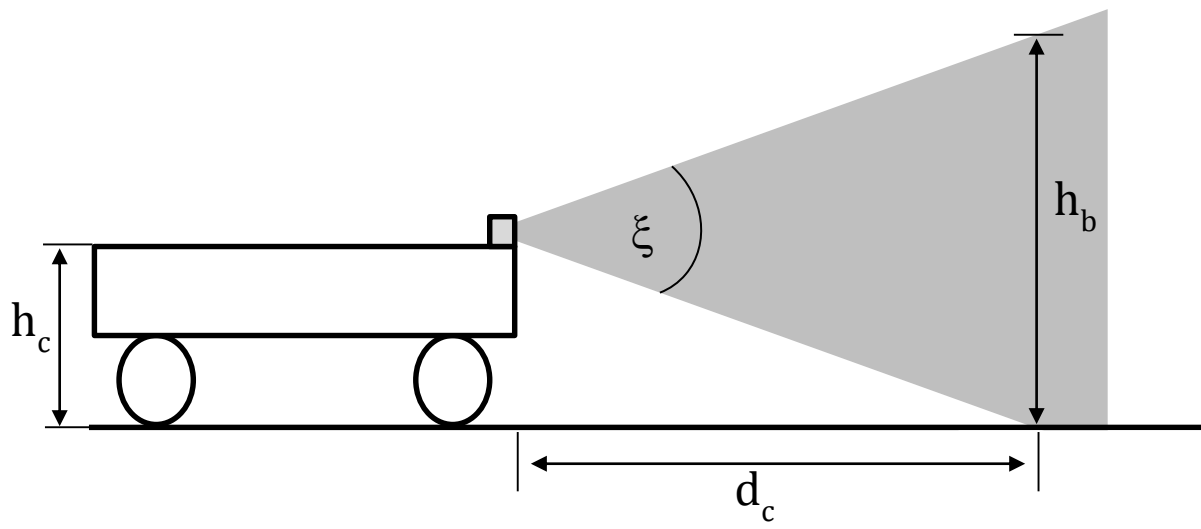


Abbildung 44: Sichtbereich der eingesetzten Kamera

8 Erprobung

Für die Validierung des entwickelten Verfahrens wurde die Anwendbarkeit der in Kapitel 6.3.1 vorgestellten Auswertemethoden auf verschiedene Szenarien in Anlehnung an die in Kapitel 5 vorgestellten Anwendungsfälle untersucht. Für die Szenarien wurden Messungen mit einer 1 m breiten, äquidistant im Abstand von 33cm angeordneten, frontal installierten Vierwandleranordnung bzw. mit einem seitlich an der Messplattform angebrachten Einzelwandler durchgeführt.

8.1 Abbildung von Objektszenen mittels Mehrwandleranordnung

Die Abbildung zweier Punktrefektoren die vor dominanten Wandreflektoren platziert sind wurde anhand eines Aufbaus bestehend aus zwei 80mm durchmessenden Rohren die z.B. Begrenzungspoller in Zufahrtswegen repräsentieren und zwei winklig zueinander angeordneten Wänden untersucht. Die winklige Anordnung der Wände führt dabei aufgrund der Überlagerung einzelner Wandreflexionen mit den Reflexionen der Punktziele zu besonders starken Störeinflüssen auf die Ortung. Es wurden Messungen an verschiedenen Objektszenen, aufgebaut aus Punkt- und Wandreflektoren, durchgeführt und mit simulierten Daten verglichen. Weiterhin wurden Untersuchungen zur Bestimmung der Rechenzeit des Algorithmus im Vergleich zu Auswertungen durch die Hough Transformation sowie eine prototypische Umsetzung einer Anzeige der gewonnenen Information als augmented reality Darstellung durchgeführt. Abbildung 45 zeigt exemplarisch eine Objektszene mit zwei Punktstreuern vor zwei winkligen Wandreflektoren.

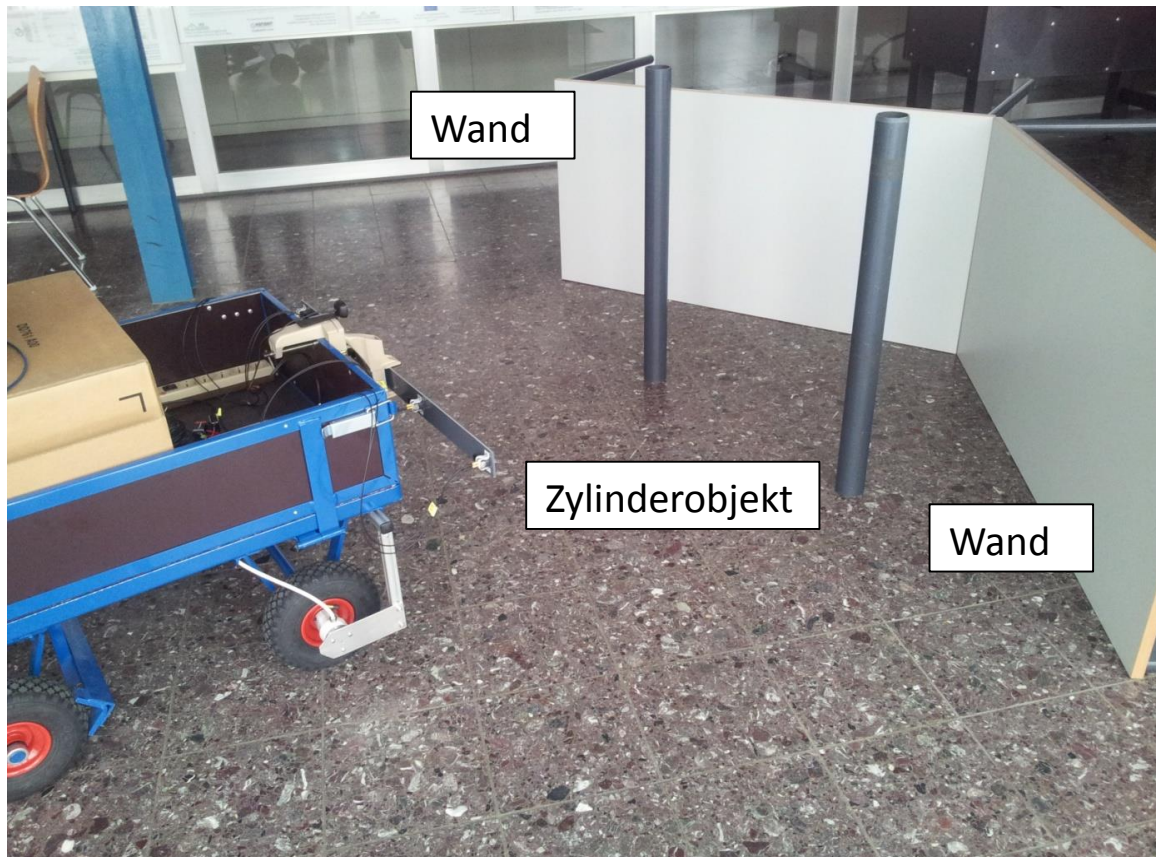


Abbildung 45: Messszenario für die Abbildung von Objektszenen mehrerer Objektklassen

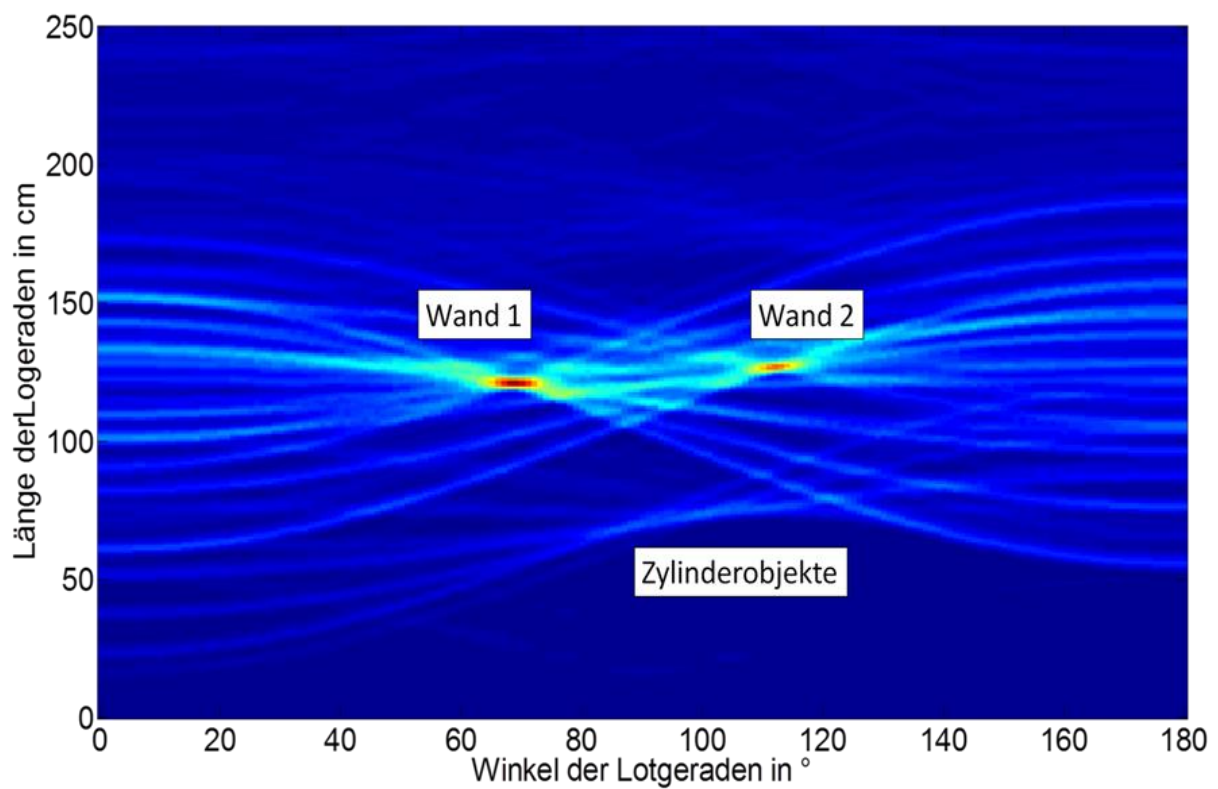


Abbildung 46: Parameterraum der Objektszene

8.1.1 Abbildung von Objektszenen mit mehreren Objektklassen

Die durchgeführten Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung der tatsächlich aus Messungen erhaltenen Parameterräume mit den auf Basis des theoretischen Modells vorhergesagten. Abbildung 47 und Abbildung 48 zeigen die simulierten, bzw. gemessenen Bildräume für eine Objektszene mit zwei Wänden unter 135° zueinander im Abstand von 150 cm direkt vor der Wandleranordnung.

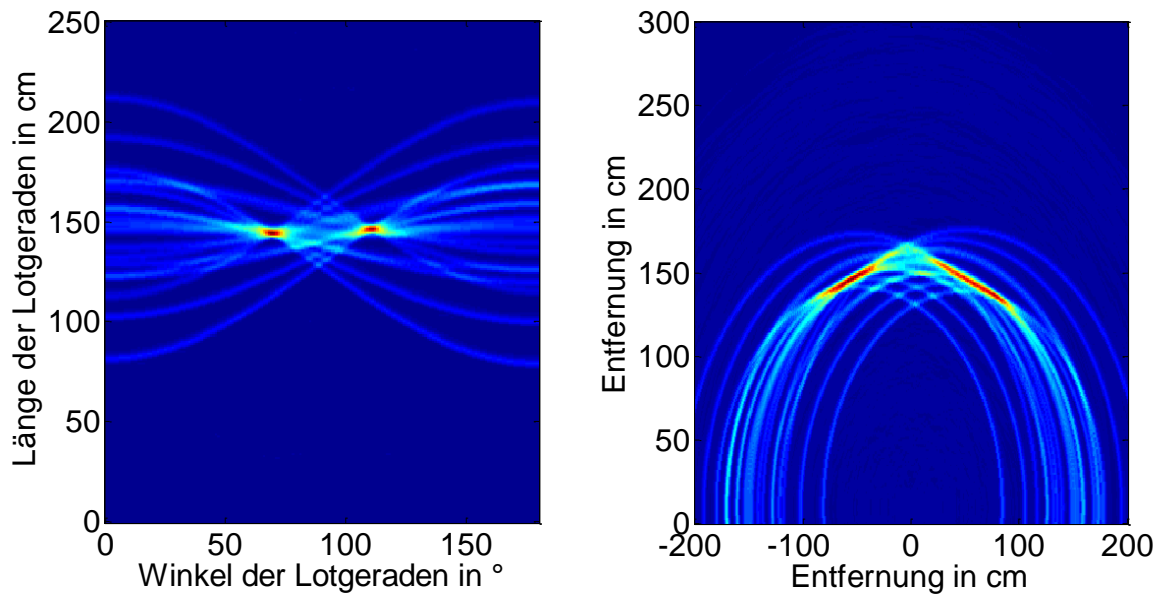


Abbildung 47: Simulierte Bildräume für Linienfilter (links) und Punktfilter (rechts)

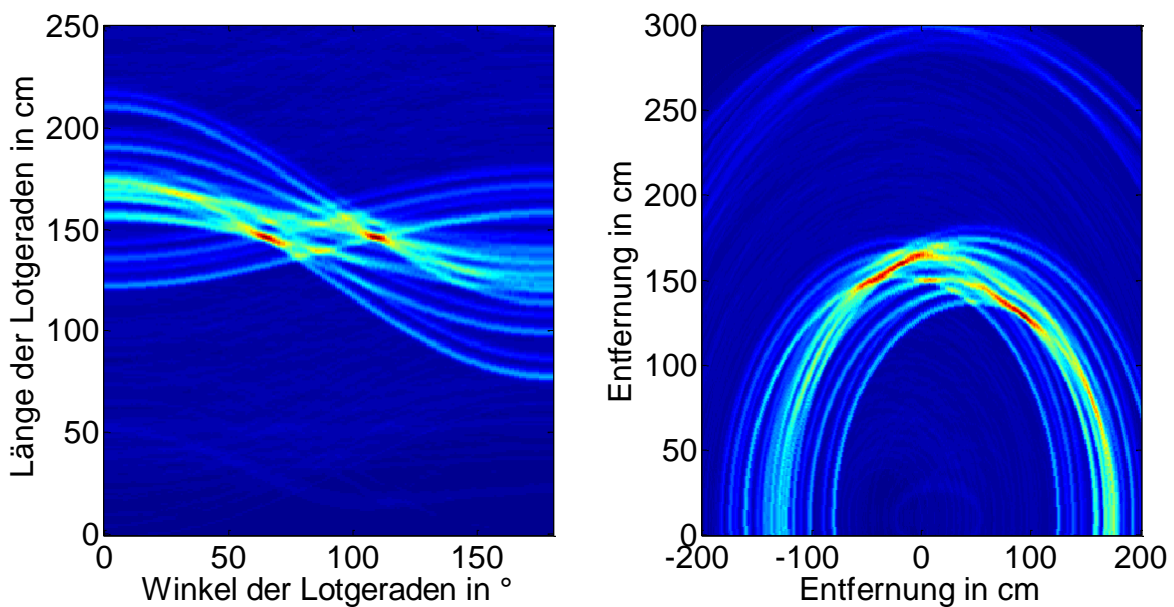


Abbildung 48: Gemessene Bildräume für Linienfilter (links) und Punktfilter (rechts)

Die Querempfindlichkeit des entwickelten Verfahrens gegenüber anderen Objektklassen, wie etwa Punkstreuern wurde sowohl simulativ als auch durch Messungen überprüft. Abbildung 49 zeigt die Ergebnisse aus Simulation und Messung für einen Punkstreuer im Abstand von 120 cm, und einem horizontalen Versatz von 36 cm zur Wandleranordnung.

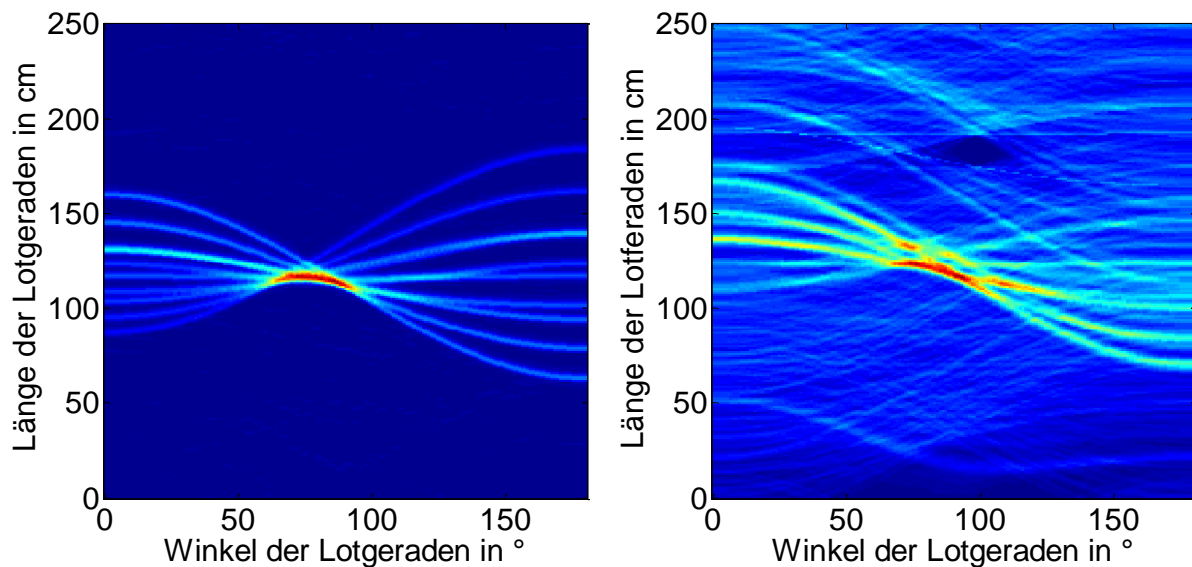


Abbildung 49: Simulierter (links) und gemessener (rechts) Bildraum für ein Punktziel

Auch hier ergibt sich eine gute Übereinstimmung von Theorie und Messung. Die Überlagerung der Echos im Parameterraum liefert einen deutlich unschärferen Bereich, wodurch auch der Maximalwert der Überlagerung deutlich unterhalb eines tatsächlichen Linienreflektors liegt. Um die Selektivität des Filters zu bewerten wurde die Filterausgabe für einen Punkt- und einen Linienstreuer derselben Reflektivität, also mit identischen Echoamplituden am Eingang, an derselben Position verglichen.

Abbildung 50 zeigt einen Schnitt durch die Filterausgabe in Objektentfernung über den gesamten ausgewerteten Winkelbereich von 180° .

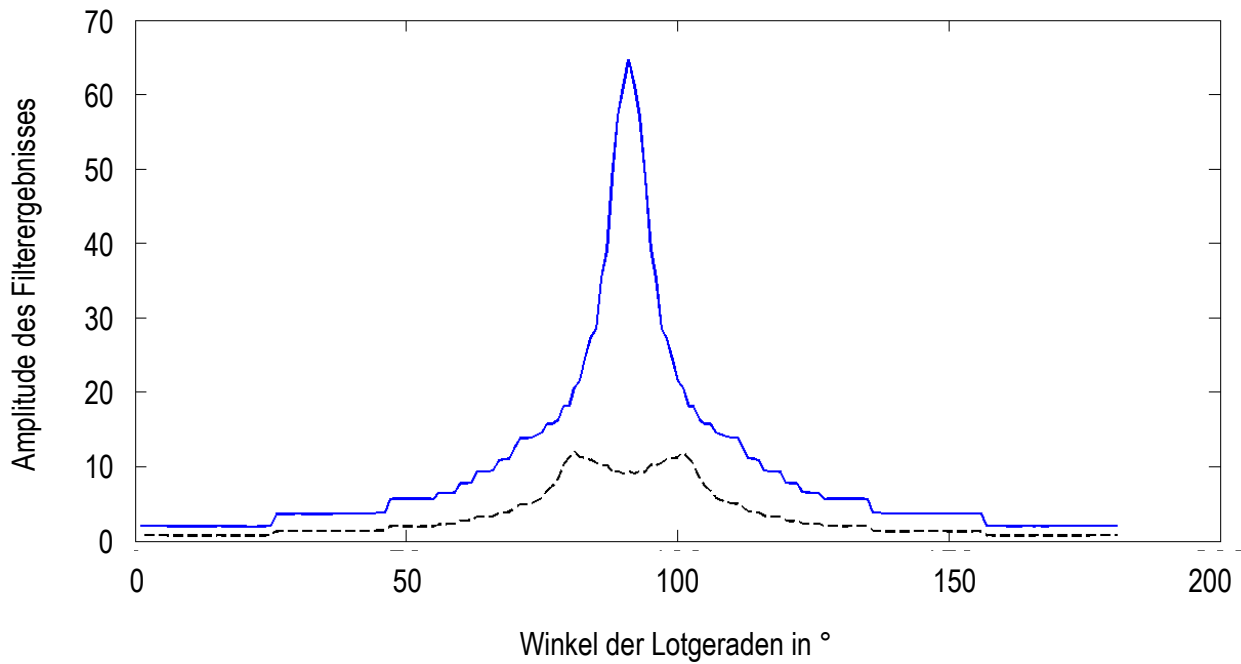


Abbildung 50: Filterausgabe für Punkt- und Linienstreuer über den gesamten Winkelbereich in Objektentfernung

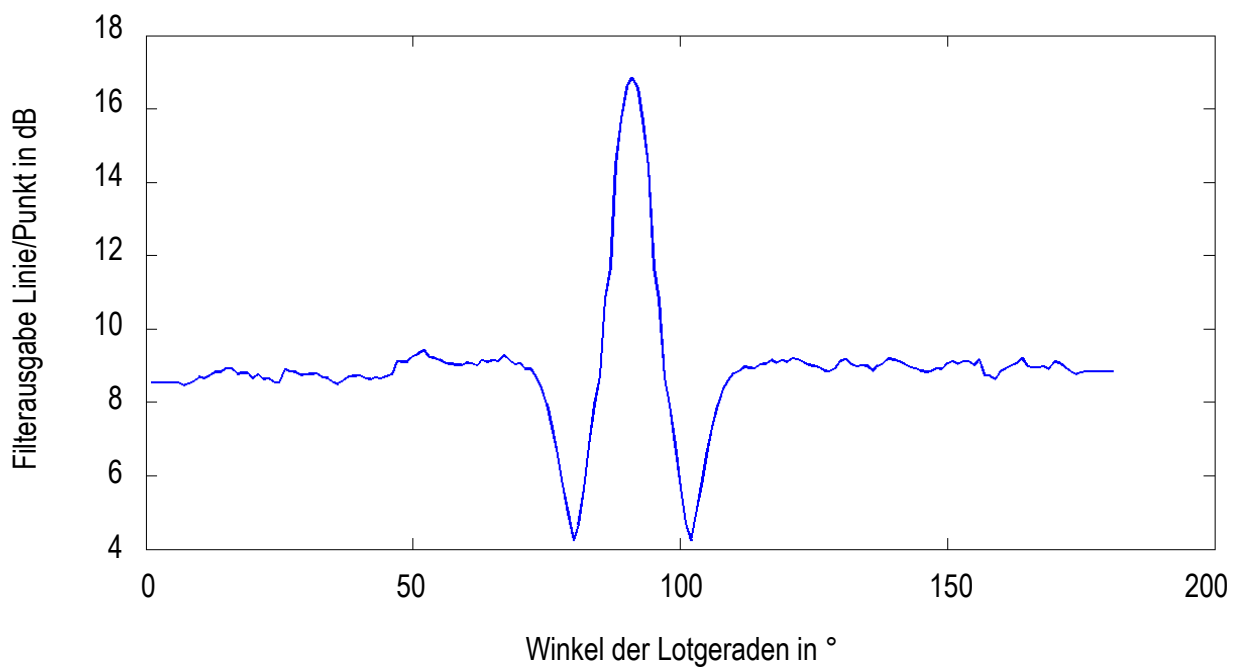


Abbildung 51: Verhältnis der Filterausgabe für Punkt- und Linienstreuer über den gesamten Winkelbereich in Objektentfernung

Es ist deutlich zu erkennen, dass das Optimalfilter für die zu detektierende Objektklasse, also Linienstreuer, deutlich höhere und angular deutlich eindeutigere Ergebnisse liefert. Der Gewinn für die Objektklassifizierung wird in

Abbildung 51 in Dezibel wiedergegeben und beträgt 16,83 dB.

Nachfolgend sollen Messergebnisse vorgestellt werden, welche mit dem zuvor beschriebenen Wandlerarray aufgenommen wurden.

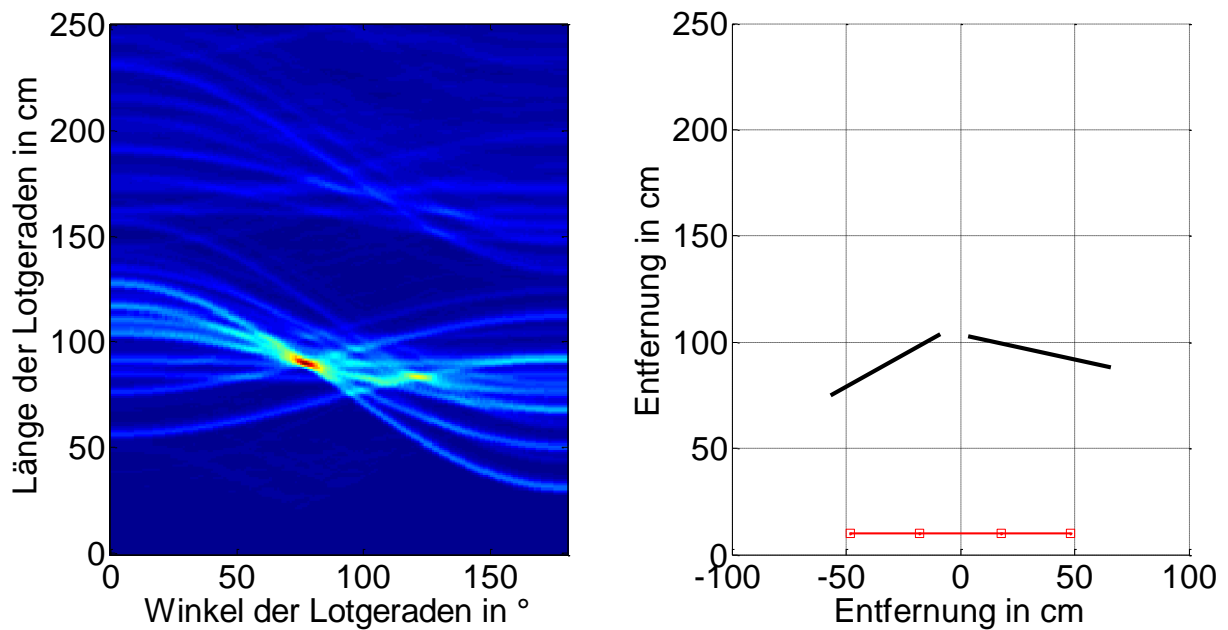


Abbildung 52: Rekonstruktion einer Objektszene mit zwei Wänden unter 135°

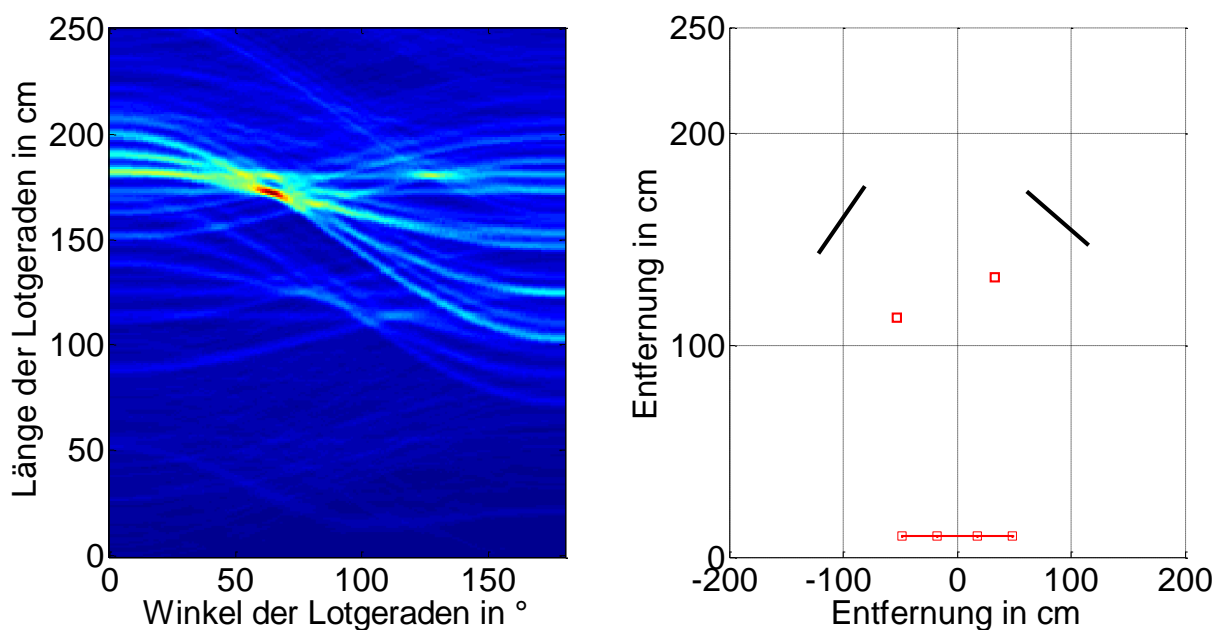


Abbildung 53: Rekonstruktion einer Objektszene mit zwei Wänden unter 135° und zwei Punktstreuern

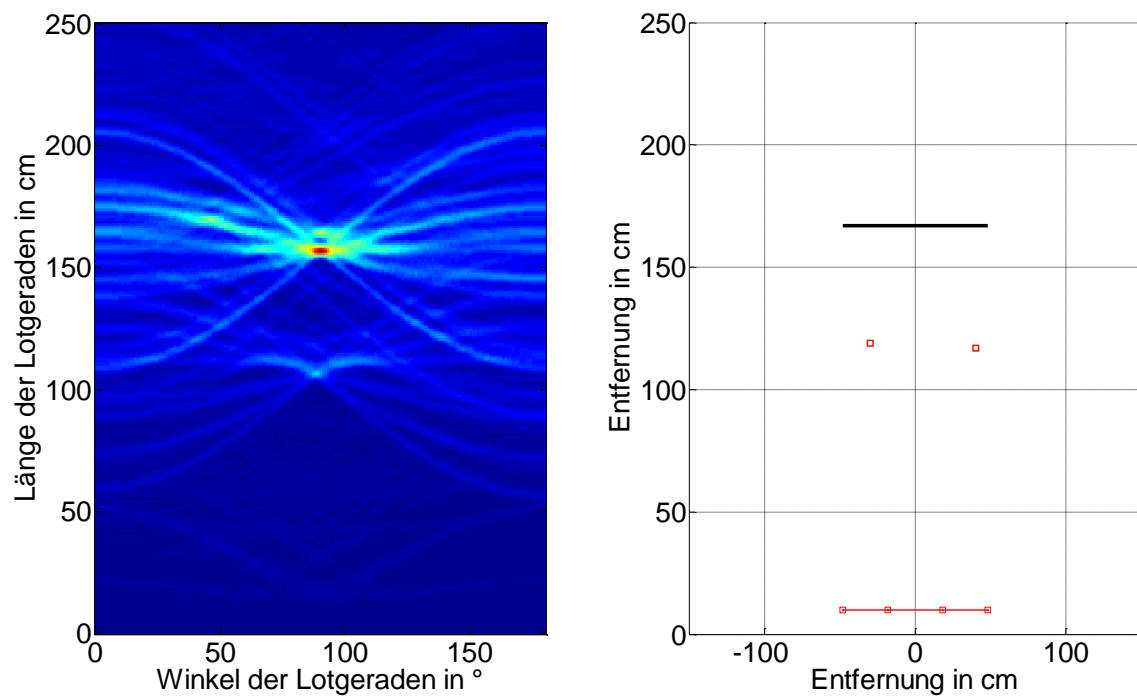


Abbildung 54: Objektrekonstruktion bei einer Wand und zwei Punktstreuern

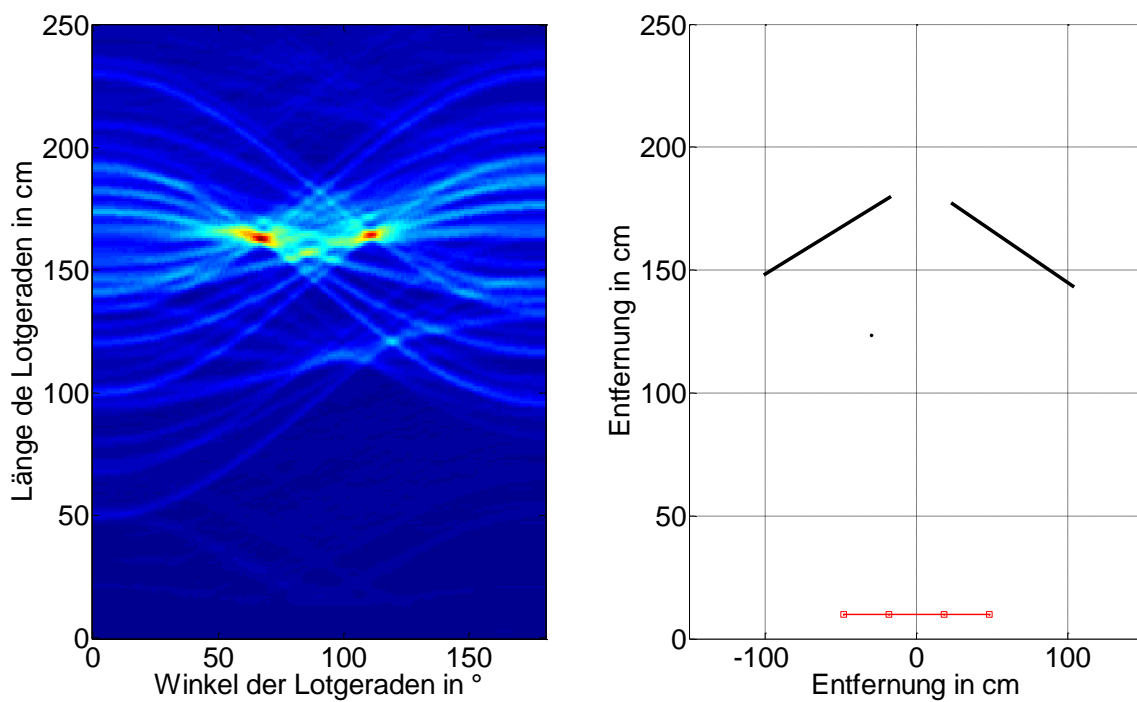


Abbildung 55: Objektrekonstruktion bei Mehrzielszenario

8.1.2 Unterdrückung der Signalanteile erkannter Objektklassen

Zur Validierung der in Kapitel 6.5.3 vorgestellten Verfahrens zur Unterdrückung der Signalanteile bereits klassifizierter Objekte wurden ebenfalls Messreihen durchgeführt. Abbildung 56 zeigt ein exemplarisches Ergebnis einer solchen Messung.

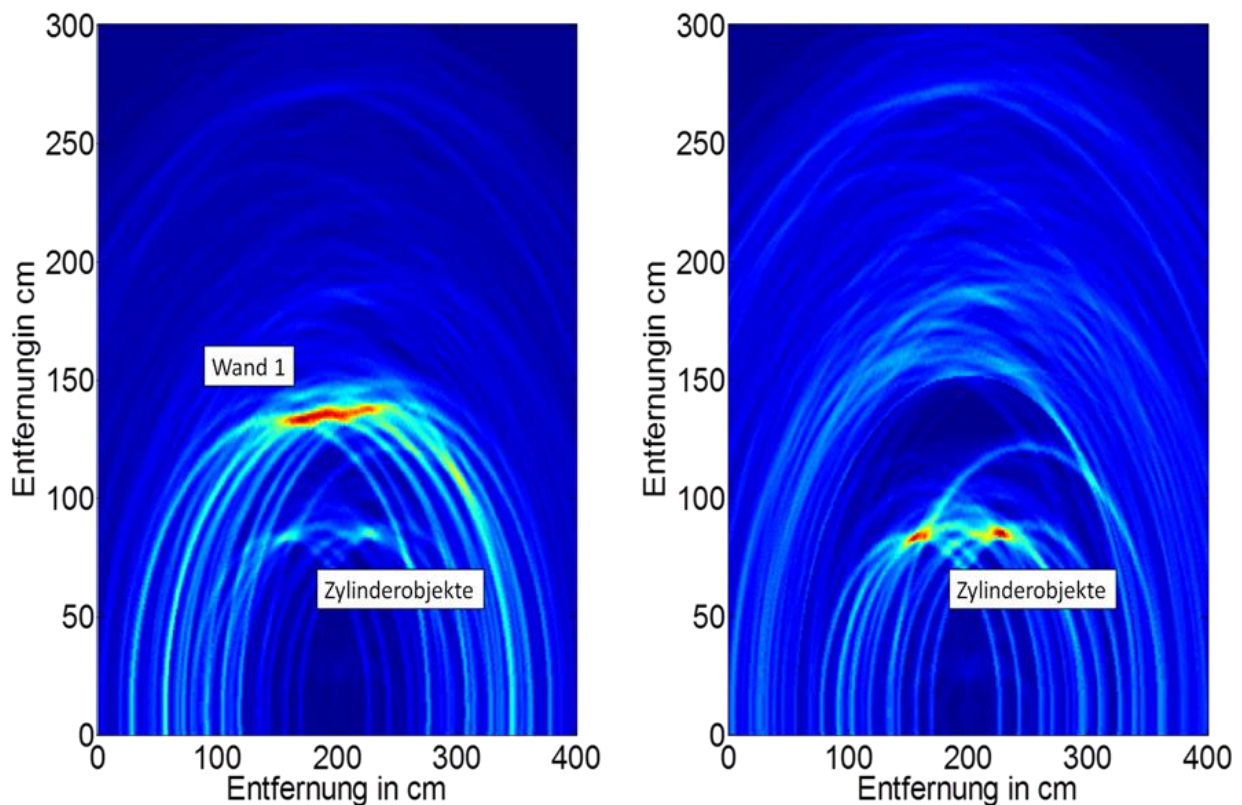


Abbildung 56: Bildraum der laufzeitrichtigen Addition vor (links) und nach der Unterdrückung (rechts)

Der Bildraum des Punktfilters im linken Bild zeigt die dominanten Radian, welche durch den Flächenreflektor erzeugt werden, und die Positionsbestimmung der beiden Zylinderobjekte überlagern. Aufgrund der deutlich höheren Reflektivität des Linienstreuers besitzen die einzelnen Radian Amplitudenwerte, welche betragsmäßig im Bereich der überlagerten Amplitude aller Radian der Zylinderobjekte liegen.

Im rechten Bild kann man deutlich erkennen, dass sich der Einfluss des dominanten Reflektors durch die Unterdrückung der Signalbereiche welche den Zuordnungstabellen des detektierten Linienstreuers entsprechen, deutlich reduzieren lässt.

8.1.3 Prototypische Augmented-Reality-Darstellung der gewonnenen Objektinformation

Als eine prototypische Umsetzung der durch das neue Verfahren gewonnenen, klassifizierten Objektinformation wurde eine visuelle Mensch-Maschine-Schnittstelle implementiert. Hierzu wurde das Live-Bild in Echtzeit mit den durch die Ultraschallsensorik gewonnenen Informationen überlagert. Abbildung 53 zeigt den Ergebnisraum des vorgestellten Verfahrens sowie das zugehörige Videobild. Die Objektklassen wurden hierbei farblich unterschieden, wobei Flächenreflektoren in Rot und Punktstreuer in Blau dargestellt wurden.

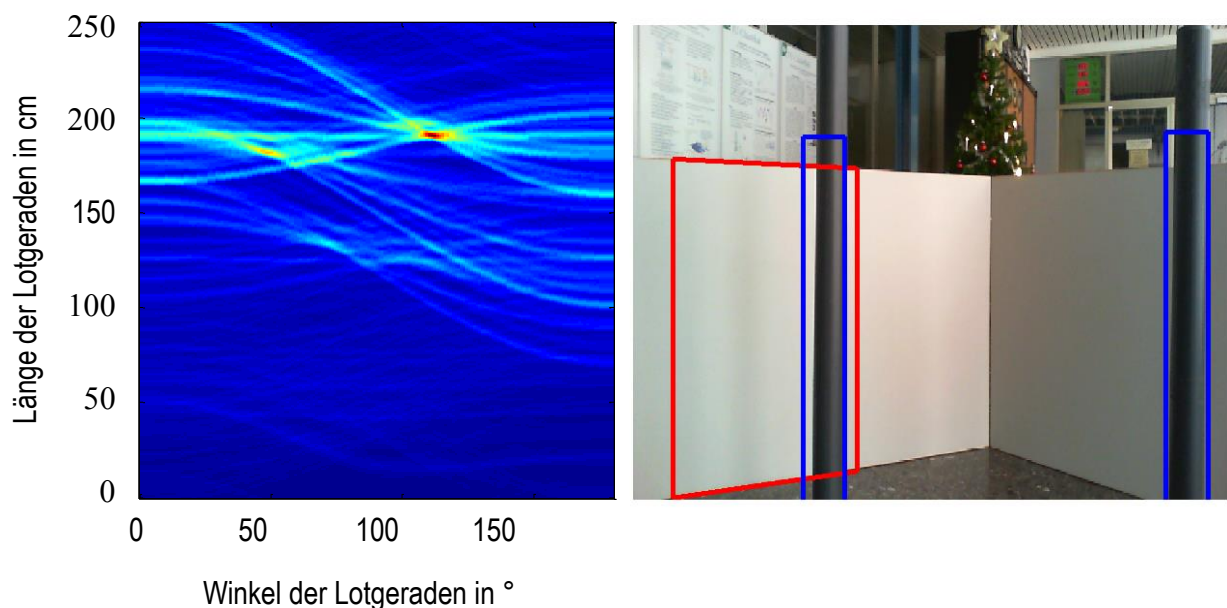


Abbildung 57: Augmented Reality Bild

Die Informationen über relative Position zur Kamera, sowie den relativen Winkel und die Ausdehnung der Linienreflektoren sowie die Positionen der Punktstreuer wurde dem Videobild anschließend perspektivisch korrekt überlagert.

8.2 Konturenabbildung quer zur Fahrtrichtung

Wie in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bereits erwähnt ist für die Einfahrt eines Fahrzeugs in eine beengte Gasse quer zur Fahrtrichtung vor allem der Zeitpunkt des Lenkeinschlags von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund kommt der Bestimmung der Buchtbegrenzungen bzw. der Buchtkonturen eine zentrale Rolle bei der Realisierung einer autonomen Fahrzeugführung für das beschriebene Szenario zu.

Die Messungen zur Bestimmung der Abbildungsqualität hinsichtlich Umgebungskonturen wurden mit einem einzelnen Wandler durchgeführt, welcher seitlich an der Messplattform angebracht wurde. Es wurden zwei Umgebungsszenarien untersucht. Zum einen wurde die Vermessung einer durchgehenden Palettenfront durch Messfahrten in einem beengten Korridor nachgestellt, zum anderen wurden lose verteilte Güterpaletten durch parkende Fahrzeuge simuliert. Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen die beiden Messszenarien.

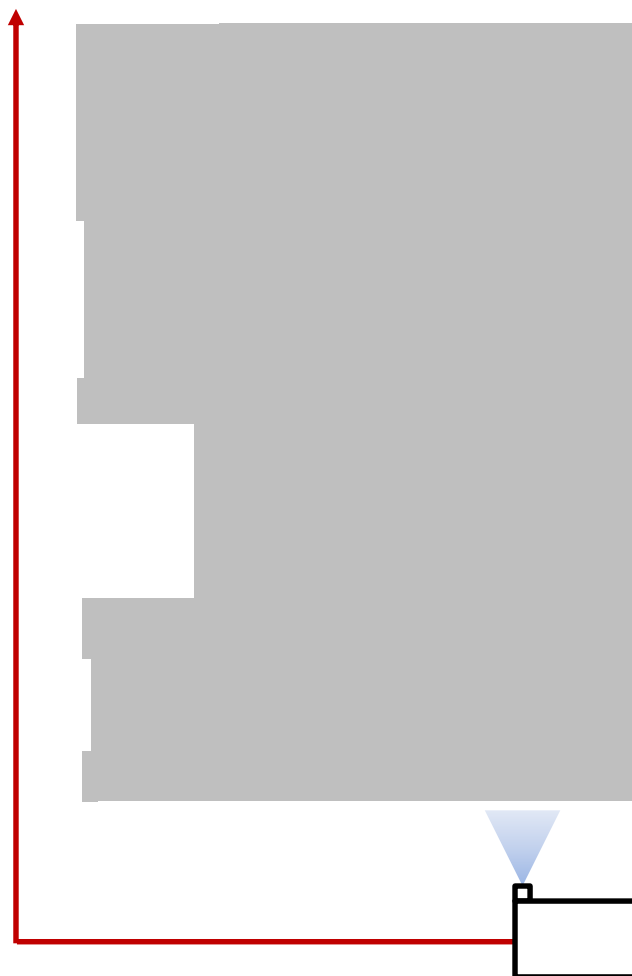


Abbildung 58: Messszenario Palettenfront



Abbildung 59: Messszenario lose Güterpaletten

8.2.1 Bewegter Einzelwandler

Zur Bestimmung des angularen Auflösungsvermögens des Verfahrens bei synthetischer Wandleranordnung wurden Messungen Am Szenario „lose Güterpaletten“ aufgenommen. Als Maß für das angularae Auflösungsvermögen wurde die laterale -3dB Ausdehnung des Überlagerungsergebnisses im Parameterraum herangezogen.

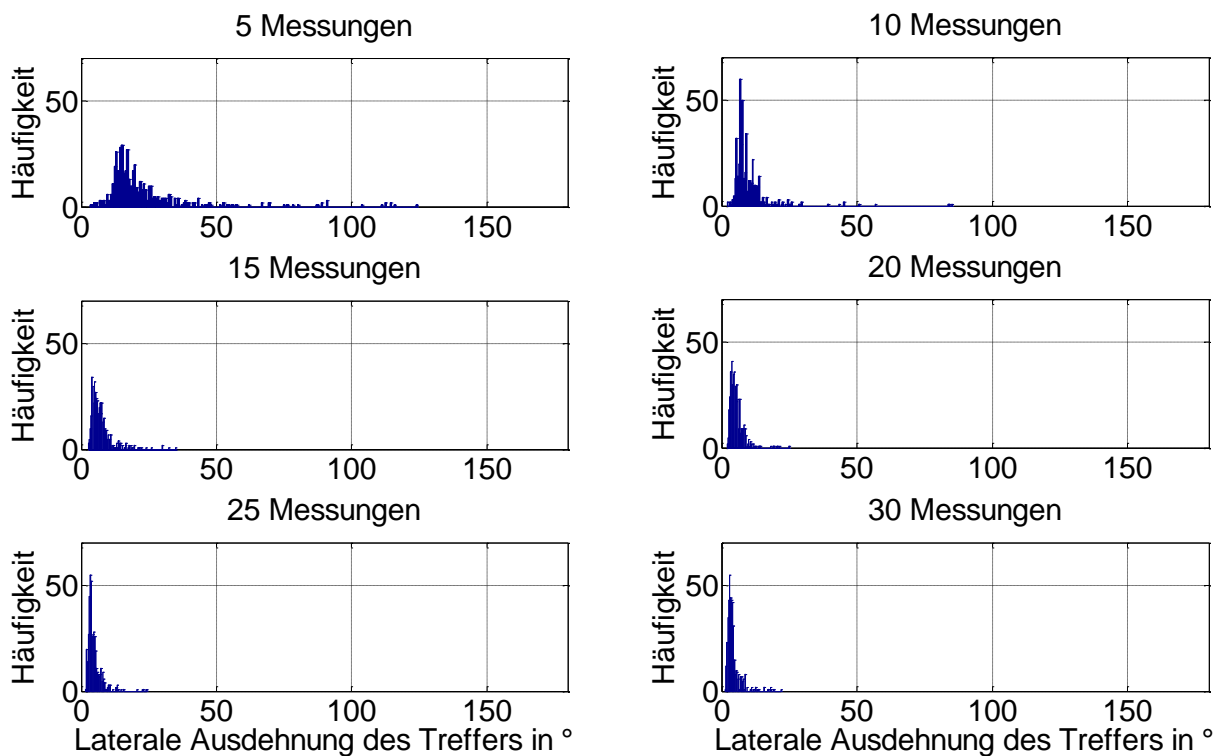


Abbildung 60: Angulares Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke für das Messszenario „lose Güterpaletten“

Wie in Kapitel 6.5.4 beschrieben, hängt die erzielbare Auflösung bei synthetischen Wandleranordnungen vom Öffnungswinkel des Einzelwandlers, der überstrichenen Strecke und dem Abstand zum reflektierenden Objekt ab.

Das erzielbare Auflösungsvermögen soll anhand einer Messung entlang eines Fahrzeughecks in einer Entfernung von 50cm zum Wandler exemplarisch gezeigt werden. Bei einem -3dB Öffnungswinkel des Wandlers von 80° und dem erwähnten Abstand von 50cm zum reflektierenden Objekt ergibt sich die maximal auswertbare Ausdehnung der synthetischen Wandleranordnung nach Gleichung (6.15) zu 0,84m.

Abbildung 60 zeigt die Verteilung der gewonnenen Ergebnisse für eine komplette Messfahrt entlang des Messszenarios „lose Güterpaletten“ wohingegen Abbildung 61 die gewonnenen Ergebnisse bei einer Vorbeifahrt an einem Fahrzeugheck in einer Entfernung von 50cm mit einer mittleren Geschwindigkeit von 0,1m/s und einer Messrate von 2Hz veranschaulicht.

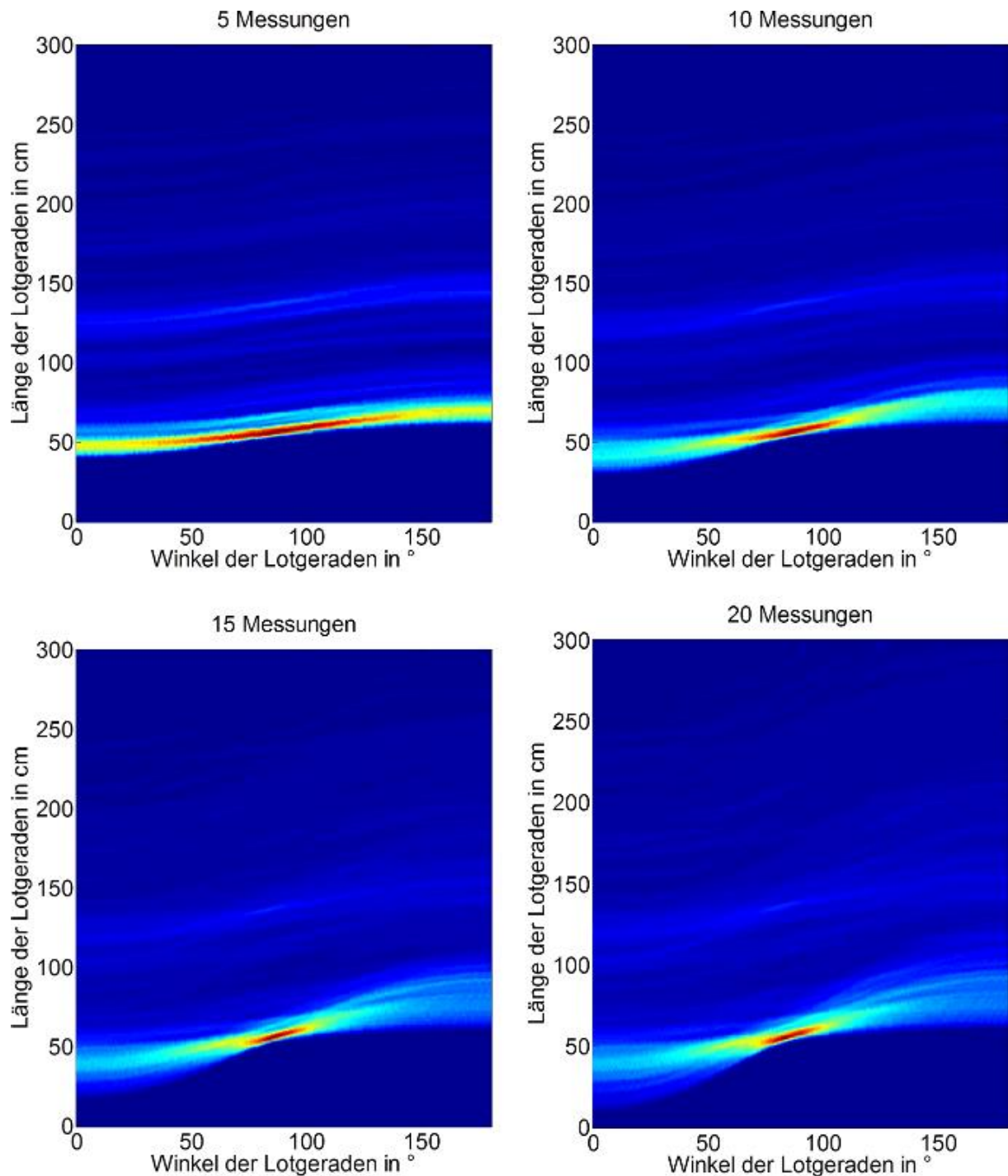


Abbildung 61: Parameterraum in Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke entlang eines Fahrzeughecks in 50cm Entfernung

Abbildung 60 zeigt sehr gut den Einfluss einer längeren Basisbreite der Wandleranordnung auf die erreichbare angulare Auflösung. Die Maxima der Häufigkeitsverteilungen verändern sich von X bei 5 sukzessiven Messungen auf X bei 25 und 30 sukzessiven Messungen. Der Gewinn bei der Auswertung von 25 hin zu 30 Messungen ist vernachlässigbar, woraus sich

schließen lässt, das bei 25 Messungen die maximal auswertbare Basisbreite der Wandleranordnung bereits erreicht wird. Da im Rahmen des gemessenen Szenarios unterschiedliche Abstände zu den reflektierenden Objekten auftreten, welche zum Großteil größer als die zur Berechnung der maximalen Basisbreite herangezogenen 50cm sind, ergibt sich hier auch eine im Mittel größere maximale Basisbreite verglichen mit der Einzelmessung.

Die in Abbildung 61 gezeigten Ergebnisse einer Einzelmessung entlang eines Fahrzeughecks im Rahmen des durchgeführten Messszenarios zeigen schon beim Sprung von 15 auf 20 Messungen keine nennenswerte Verbesserung der angularen Auflösung. Somit wird schon bei 15 sukzessiven Messungen die maximale angular Auflösung und damit die maximal nutzbare Basisbreite erreicht. Unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit des Wandlers und der verwendeten Messrate ergibt sich eine zurückgelegte Distanz des Einzelwandlers von 0,75m. Da die Messung der Geschwindigkeit, aufgrund des Handbetriebs des Messaufbaus, einer großen Schwankung unterliegt, muss die Abweichung dieser zugeschrieben werden.

Bei der Abbildung der Umgebungskonturen für die beiden untersuchten Messszenarien wurden jeweils 5 sukzessive Messungen zur Bestimmung des Konturwinkels bzw. Abstands genutzt.

Die Anzahl der verwendeten Messungen hat direkten Einfluss auf die Dynamik, bzw. Granularität des Abbildungsergebnisses. So ist die Bestimmung des Winkels mit steigender Anzahl an Messungen zwar genauer, jedoch werden so entsprechend ausgedehnte Liniensegmente erzeugt, welche schnelle Konturänderungen wie Ecken nicht abbilden können. Hier findet dann eine Tiefpassfilterung der Kontur statt, indem z.B. bei Verwendung von 30 Messungen ein Distanzsprung bei Messung 15 den Mittelwert zwischen Distanz 1 und Distanz 2 zur Folge hat.

Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen die Ergebnisse der Abbildung der Messszenarien mit einem bewegten Einzelwandler. In Abbildung 62 ist die Sensitivität des Systems auf Änderungen der Kontur in Entfernungsrichtung sehr gut zu sehen. Selbst kleine Vertiefungen von wenigen Zentimetern der vermessenen Kontur wurden abgebildet.

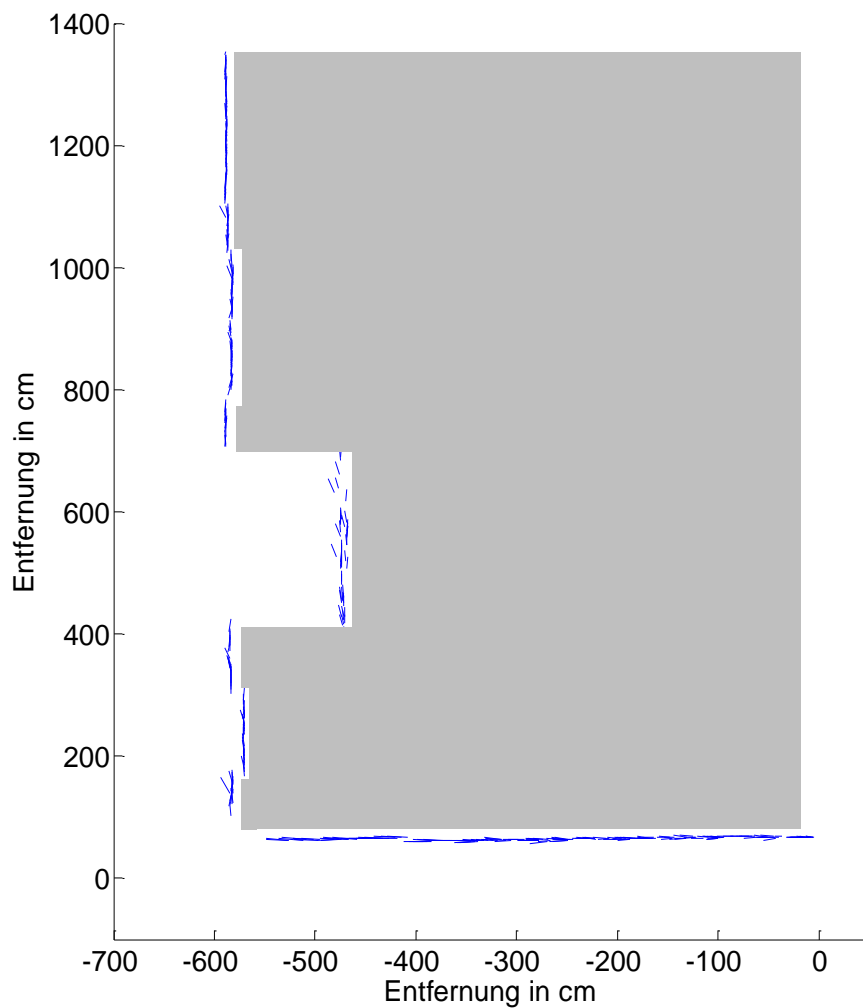


Abbildung 62: Umfeldkarte der Vermessung der „Palettenfront“

Abbildung 63 zeigt das Ergebnis der Vermessung freistehender Fahrzeuge, welche als Platzhalter für Güterpaletten genutzt wurden. Neben der generellen Abbildung der Fahrzeugheck- bzw. -Stirnseiten sind zwei Dinge besonders hervorzuheben, zum einen die Bestimmung der Ausdehnung von Punkstreuern unter Einsatz eines Wandlers mit sehr breitem Öffnungswinkel, zum anderen die Abbildung der Fahrzeugkontur beim Umfahren des Fahrzeugs. Das Verfahren bietet also die Möglichkeit während der Vorbeifahrt zwischen ausgedehnten und punktuellen Zielen zu unterscheiden, wodurch die Abbildung der Umgebung in großem Maße an Verlässlichkeit gewinnt. Zudem ermöglicht das Verfahren durch die Abbildung der „Ecken“ eine sichere Bestimmung der Abgrenzungen passierter Objekte, was für den Aspekt der Kollisionsvermeidung einer autonomen Führung von hoher Bedeutung ist. In Abbildung 63 ist die Abbildung der Objektkontur des umfahrenen Fahrzeugs bei 34m gut zu erkennen.

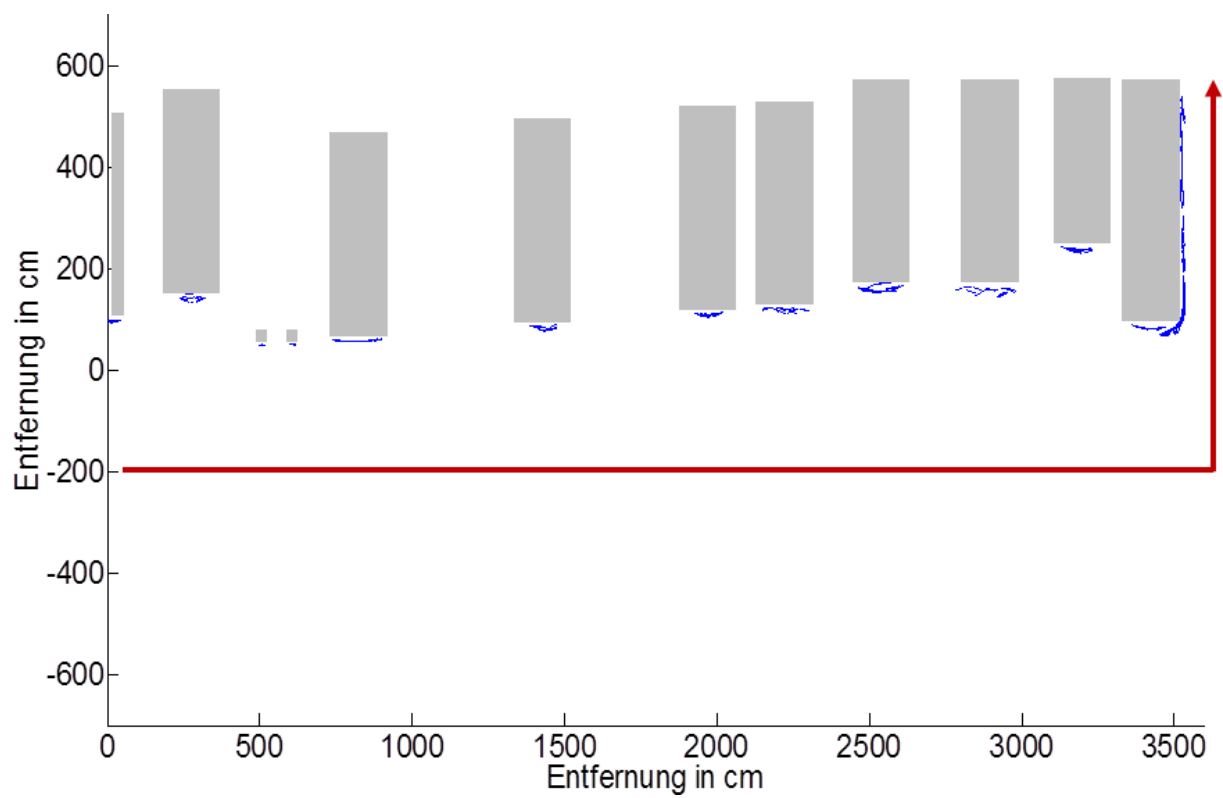


Abbildung 63: Umfeldkarte der Vermessung loser „Güterpaletten“

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren vorgestellt, welches die Umgebungsabbildung mittels wellenbasierter Sensorik für autonome Förderfahrzeuge verbessern soll. Das Verfahren steigert hierzu die Eindeutigkeit der Umgebungsabbildung aktiver, wellenbasierter Round-Trip-Time-of-Flight (RTOF) Mehr- und Einzelwandlersysteme durch eine räumliche Filterung der empfangenen Signale. Das Prinzip beruht dabei auf der Korrelation hypothetischer, a priori berechneter Signalprofile mit den tatsächlich von dem Wandlersystem empfangenen Echos. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Filter für Linienreflektoren wie etwa Wände implementiert, ist jedoch prinzipiell für beliebige Objektklassen anwendbar.

Für die Validierung des beschriebenen Optimalfilters für Linienreflektoren wurde ein handbetriebenes Messfahrzeug entwickelt, welches mit einem 4-bzw. 1-Kanal Ultraschallsystem, der dafür notwendigen Steuerelektronik, Sensoren zur Erfassung der Odometrie sowie mit einem Kamerasystem ausgestattet ist. Die Signalverarbeitung wurde auf einem angeschlossenen Standardrechner in Matlab implementiert.

Im Rahmen der durchgeführten Erprobung des Systems wurden verschiedene Szenarien untersucht, welche im industriellen Umfeld anzutreffen sind, und somit eine Relevanz für die autonome Führung von Flurförderfahrzeugen besitzen. Die Versuche zeigen, dass das Verfahren dazu geeignet ist, die Umgebungsabbildung aktuell eingesetzter Systeme zu verbessern bzw. Systeme zur Absolutpositionierung im Bereich der Kollisionsvermeidung zu unterstützen.

Das vorgestellte Verfahren ist auf alle wellenbasierten Systeme anwendbar. Einen vielversprechenden nächsten Schritt stellt die Adaption des Verfahrens für elektromagnetische Messsysteme wie etwa frequenzmodulierte Dauerstrichradare (FMCW) hoher Bandbreite dar. Eine hohe Bandbreite und damit sehr feine Distanzauflösung ist dabei vor allem für die Trennung von Punktzielen und starken Linienreflektoren empfehlenswert.

Weiterhin wäre eine Implementation für weitere Objektklassen wie etwa Kreisbogen sehr interessant, da sich aus diesen, in Abhängigkeit vom jeweiligen Radius, ebenfalls vielfältige Konturen abbilden lassen. Dies wäre jedoch mit einem dreidimensionalen Parameterraum verbunden, was wiederum einen höheren Rechenaufwand bedeutet.

10 Literaturverzeichnis

- [1] S. Peter, „An engineering approach for secure and safe wireless sensor and actuator networks for industrial automation systems,“ in *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, 2009.
- [2] J. Chen, „Distributed Collaborative Control for Industrial Automation With Wireless Sensor and Actuator Networks,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Bd. 57, Nr. 2, pp. 4219 - 4230, 2010 Dezember.
- [3] J. Akerberg, M. Gidlund und M. Bjorkman, „Future research challenges in wireless sensor and actuator networks targeting industrial automation,“ in *9th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Lissabon, Portugal, 2011.
- [4] S. E. Martin Strassner, *Das Internet der Dinge*, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [5] S. GmbH, „Symeo Absolute Positioning,“ Symeo GmbH, Juni 2013. [Online]. Available: <http://www.symeo.com/Deutsch/>. [Zugriff am Juni 2013].
- [6] H. M. M. V. J.C.F. Michel, „A novell wireless forklift positioning system for indoor and outdoor use,“ in *Positioning, Navigation and Communication, 2008. WPNC 2008. 5th Workshop on*, Hannover, 2008.
- [7] S. L. AG, „RELAG System,“ SEP Logistik AG, Juni 2013. [Online]. Available: <http://www.sepag.de/>. [Zugriff am Juni 2013].
- [8] R. Bostelman, T. Hong und R. Madhavan, „Towards AGV safety and navigation advancement obstacle detection using a TOF range camera,“ in *12th International Conference on Advanced Robotics*, Orlando, USA, 2005.
- [9] G. S. Dr. Dietmar Fischer, „Method and system for management of logistic processes and shipment tracking“. Patent DE19826568A , 3 September 2001.
- [10] N. Harper und P. McKerrow, „Recognising plants with ultrasonic sensing for mobile robot navigation,“ in *Third European Workshop on Advanced Mobile Robots*, Zürich, Schweiz, 1999.
- [11] E. R. D. Barry D. Lifschultz, „Deaths due to forklift truck accidents,“ *Forensic Science International*, Bd. 69, pp. 121 – 134, März 1994.
- [12] G. R. Tore J. Larsson, „Forklift trucks—analysis of severe and fatal occupational injuries, critical incidents and priorities for prevention,“ *Safety Science*, pp. 275 – 289, April 1994.
- [13] N. Stout-Wiegand, „Characteristics of work-related injuries involving forklift trucks,“ *Journal of Safety Research*, Bd. 18, pp. 179 – 190, Winter 1987.

- [14] W. S. R. Bostelman, „Advanced Sensing Towards Improved Forklift Safety,“ in *10th Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*, New York, 2010.
- [15] Bundesnetzagentur, Frequenznutzungsplan, Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation und Eisenbahnen, 2012.
- [16] G. Ulrich, Fahrerlose Transportsysteme, Eine Fibel – mit Praxisanwendungen – zur Technik – für die Planung, Berlin: Vieweg+Teubner, 2011.
- [17] O. W. B. W. D. Lecking, „Localization in a wide range of industrial environments using relative 3D ceiling features,“ in *13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Hamburg, 2008.
- [18] D. K. Schniz, „LogTrek© – System for Tracking and Analyzing of Forklift Truck Activity,“ Dr. Schniz GmbH, Juni 2013. [Online]. Available: http://www.schniz.de/logtrek_usa/. [Zugriff am Juni 2013].
- [19] D. K. E. Nassal, „NoColl-Sensoren,“ tbm hightech control GmbH, Juni 2013. [Online]. Available: <http://www.tbm.biz/mod/Technologien+und+Sensortechnik/Infrarotsysteme/NoColl-Sensoren-D.htm?id=164>. [Zugriff am juni 2013].
- [20] Y. Products, „Yellow Products,“ Juni 2013. [Online]. Available: <http://www.save-ty.com/catalog.htmlv>. [Zugriff am Juni 2013].
- [21] J. Borenstein and Y. Koren, "High-speed Obstacle Avoidance for Mobile Robots," in *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Arlington, USA, 1988.
- [22] J. Borenstein und Y. Koren, „Obstacle avoidance with ultrasonic sensors,“ *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Bd. 4, Nr. 2, pp. 213 - 218, April 1988.
- [23] J. Borenstein und Y. Koren, „The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots,“ *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Bd. 7, Nr. 3, pp. 278 - 288, Juni 1991.
- [24] A. Azenha und A. Carvalho, „A neural network approach for AGV localization using trilateration,“ in *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Porto, Portugal, 2009.
- [25] T. Y. Teo, J. S. Chai und W. L. Yao, „Design of a positioning system for AGV navigation,“ in *7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapur, 2002.
- [26] Y.-B. Yu und J.-Y. Gan, „Self-localization using alternating combination trilateration for sensor nodes,“ in *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Baoding, Hebei, China, 2009.
- [27] Y. Du, X. Gao, Z. Liu und M. Sun, „The new navigation system for automatic guided vehicle,“ in *Chinese Control and Decision Conference*, Yantai, China, 2008.
- [28] M. Holder, M. Trivedi und S. Marapane, „Mobile robot navigation by wall following using a rotating ultrasonic scanner,“ in *13th International Conference on Pattern Recognition*, Wien,

Österreich, 1996.

- [29] W. Li, „Fuzzy logic based robot navigation in uncertain environments by multisensor integration,“ in *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Las Vegas, USA, 1994.
- [30] I. Ashokaraj, A. Tsourdos, P. Silson und B. White, „A Robust Approach to Multiple Sensor Based Navigation for an Aerial Robot,“ in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006.
- [31] M. Cong und B. Fang, „Multisensor fusion and navigation for robot mower,“ in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Sanya, China, 2007.
- [32] G. Meng, L. Wanli und W. Zhankui, „Robot Navigation Based on Multi-sensor Data Fusion,“ in *Second International Conference on Digital Manufacturing and Automation*, Zhangjiajie, Hunan, China, 2011.
- [33] L. Yenilmez und H. Temeltas, „Real time multi-sensor fusion and navigation for mobile robots,“ in *9th Mediterranean Electrotechnical Conference*, Tel-Aviv, Israel, 1998.
- [34] I. O. f. Standardization, *ISO 9613-1:1993*, Genf, Schweiz: International Organization for Standardization, 2010.
- [35] C. K. M. P. JIANSHE CHEN, „ACOUSTIC ENVELOPE DETECTOR FOR CRISPNESS ASSESSMENT OF BISCUITS,“ *Journal of Texture Studies*, pp. 139-156, April 2005.
- [36] K. Larkin, „Efficient demodulator for bandpass sampled AM signals,“ *Electronics Letters*, pp. 101 - 102, August 2002.
- [37] Y. B.-S. T. Kirubarajan, „Low observable target motion analysis using amplitude information,“ *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Bd. 32, pp. 1367 - 1384, Oktober 1996.
- [38] J. J. S. Bradford W. Parkinson, *Global Positioning System: Theory and Applications*, Bd. 1, Reston, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996.
- [39] C. Evrendilek und H. Akcan, „On the Complexity of Trilateration with Noisy Range Measurements,“ *IEEE Communications Letters*, Bd. 15, pp. 1097 - 1099, Oktober 2011.
- [40] J. van Kleef, J. Bergmans, L. Kester und F. Groen, „Multiple-Hypothesis Trilateration and Tracking with Distributed Radars,“ in *9th International Conference on Information Fusion*, Florenz, Italien, 2006.
- [41] Y. Zhou, „An efficient least-squares trilateration algorithm for mobile robot localization,“ in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, USA, 2009.
- [42] Z. Yang und Y. Liu, „Quality of Trilateration: Confidence-Based Iterative Localization,“ *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Bd. 21, Nr. 5, pp. 631 - 640, Mai 2010.

- [43] M. Vossiek, „Object recognition method“. Patent EP19950116062 , 10 November 1995.
- [44] M. Vossiek, „Abbildungsverfahren mittels synthetischer Apertur, Verfahren zur Bestimmung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einem wellenbasierten Sensor und einem Objekt bzw. Vorrichtung zur Durchführung der Verfahren“. Patent DE102009030076 , 23 Juni 2009.
- [45] M. Vossiek, A. Urban, S. Max und P. Gulden, „Inverse Synthetic Aperture Secondary Radar Concept for Precise Wireless Positioning,“ *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Bd. 55, Nr. 11, pp. 2447 - 2453, November 2007.
- [46] A. H. S. L. H. W. R. Grewe, „Umfeldmodelle. Standardisierte Schnittstellen fuer Assistenzsysteme,“ *ATZ ELEKTRONIK* , pp. 334-338, September 2012.
- [47] D. J. Effertz, Autonome Fahrzeugführung in urbaner Umgebung, Braunschweig: Institut für Regelungstechnik, TU Braunschweig, 2009.
- [48] G. Shaefer, A mathematical theory of evidence, New Jersey: Princeton Press, 1976.
- [49] K. Kroschel, G. Rigoll und B. Schuller, Statistische Informationstechnik, Signal - und Mustererkennung, Parameter- und Signalschätzung, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [50] M. T. R.C. Gonzalez, Syntactic pattern recognition: an introduction, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, , 1978.
- [51] K. Fu, Syntactic pattern recognition and applications, Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 1982.
- [52] K. Fukunaga, Introduction to Statistical Pattern Recognition, Waltham, USA: Academic Press, 1990.
- [53] J. K. Pierre A. Devijver, Pattern recognition: A statistical approach, Prentice Hall International , 1982.
- [54] G. A. H Bunke, „Inexact graph matching for structural pattern recognition,“ *Pattern Recognition Letters*, Bd. 1, pp. 245 – 253, Mai 1983.
- [55] C. G. Looney, Pattern recognition using neural networks: theory and algorithms for engineers and scientists, New York: Oxford University Press, Inc. , 1997.
- [56] J. P. J. I. J. K. HK Yuen, „Comparative study of Hough Transform methods for circle finding,“ *Image and Vision Computing*, Bd. 8, pp. 71 – 77, Februar 1990.
- [57] E. O. P. K. Lei Xu, „A new curve detection method: Randomized Hough transform (RHT),“ *Pattern Recognition Letters*, Bd. 11, pp. 331 – 338, Mai 1990.
- [58] D. Ballard, „Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes,“ *Pattern Recognition*, Bd. 13, pp. 111 – 122, September 1981.

- [59] J. K. J. Illingworth, „The Adaptive Hough Transform,“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 690 - 698, September 1987.
- [60] V. Leavers, „Which Hough Transform?,“ *CVGIP: Image Understanding*, Bd. 58, p. 250–264, September 1993.
- [61] M. A. L. R. J. L. M. Hungwen Li, „Fast Hough transform: A hierarchical approach,“ *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Bd. 36, pp. 139 – 161, November 1986.
- [62] B. Heiing, M. Ersoy und S. Gies, *Fahrwerkhandbuch, Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [63] O. W. B. W. D. Lecking, „Variable Pallet Pick-Up for Automatic Guided Vehicles in Industrial Environments,“ in *11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Prag, Tschechische Republik, 2006.
- [64] D. W. L. F. Y. K. J. Borenstein, „MOBILE ROBOT NAVIGATION IN NARROW AISLES WITH ULTRASONIC SENSORS,“ in *ANS 6th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, Monterey, USA, 1995.
- [65] C. Huygens, *Traité de la lumière*, Paris: Gauthier-Villars, 1920.
- [66] E. Skudrzyk, *The Foundations of Acoustics*, Springer Vienna, 1971.
- [67] C. Huygens, *Treatise on Light*, Eimsbüttel: Tredition, 2012.
- [68] R. S. G. R. M. M. Walter G. Carrara, *Spotlight synthetic aperture radar: Signal processing algorithms*, Norwood, USA: Artech House Inc, 1995.
- [69] H. A. Z. M. Goldstein, „Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations,“ *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Bd. 91, pp. 4993 – 4999, April 1986.
- [70] G. Stimson, *Introduction to airborne radar*, Raleigh, USA: Scitech Pub Inc, 1998.
- [71] H. K. /. W. H. (Hgg.), „Radar mit realer und synthetischer Apertur,“ 1999.
- [72] H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, Berlin: Vieweg+Teubner Verlag, 2009.